

Sommaire

Remerciements	i
Sommaire	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	iv
Liste des abréviations et symboles	v
INTRODUCTION.....	2
PARTIE 1. GENERALITE.....	3
CHAPITRE 1 PRESENTATION DE LA ZONE D' ETUDE	4
CHAPITRE 2 GENERALITES SUR LE SORGHO	13
PARTIE 2. METHODOLOGIE.....	22
CHAPITRE 3 PRESENTATION DU MODELE	23
CHAPITRE 4 DESCRIPTION DES DONNEES.....	34
PARTIE 3. TRAITEMENT DES DONNEES ANALYSES ET RESULTATS	36
CHAPITRE 5 RESULTATS OBTENUS	37
CHAPITRE 6 DISCUSSIONS	48
CONCLUSION.....	51

Liste des figures

Figure 1- Délimitation: Région Androy& Région Anosy	5
Figure 2-Plante de sorgho	13
Figure 3: Organigramme globale du modèle CROPWAT	33
Figure 4: Histogramme d'évapotranspiration réelle	37
Figure 5: Précipitation efficace des six stations	39
Figure 6: Besoin en eau décadaire du sorgho à la station de Tsihombe	40
Figure 7: Besoin en eau décadaire du sorgho a la station BELOHA	41
Figure 8: Besoin en eau décadaire du sorgho à la station BEKILY	41
Figure 9: Besoin en eau décadaire du sorgho à la station d'Amboasary	42
Figure 10: Besoin en eau décadaire du sorgho à la station TAOLAGNARO	42
Figure 11: Besoin en eau décadaire du sorgho à la station AMBOVOMBE	43
Figure 12: Histogrammes d'irrigation des six stations	44
Figure 13: Calendrier d'irrigation à Tsihombe à partir du modèle CROPWAT	45
Figure 14: histogramme d'irrigation du sorgho du station de Tsihombe.....	46
Figure 15;Bilan hydrique journalier du sorgho à partir du modèle CROPWAT	47
Figure 16: Courbe de besoin et précipitation efficace des six station	48
Figure 17: cycle cultural du sorgho en contre saison	49
Figure 18: Histogramme de besoin en irrigation	50

Liste des tableaux

Tableau 1- Répartition de la superficie par district	6
Tableau 2- Liste des stations météorologiques.....	7
Tableau 3- différents vents d'Androy	8
Tableau 4: Température moyenne	10

Liste des abréviations et symboles

BV : Bassin Versant
CC : Capacité au Champ
CWR :Crop Water Requirement
D : Drainage
DGM : Direction Générale de la Météorologie
DJ : Degré-jours
 e_a : Pression réelle de la vapeur
 e_s : Pression de la vapeur à saturation
Etc : Évapotranspiration réelle
ETm : Evapotranspiration maximale
ETP : Evapotranspiration potentielle
FAO : Food and Agriculture Organisation
G : Flux de chaleur échangé avec le sol
Irr : Apport de l'irrigation
 Irr_{req} : Irrigation requise
J : jour
Kc : Coefficient cultural
Ky : Coefficient de réponse du rendement
Nb : Nombre
Obs. : Observation
P : Fraction d'épuisement maximum
Peff :Précipitation efficace
PF : Point de Flétrissement
 P_{tot} : Précipitation totale
RAM : Réserve utile facilement disponible
RAW : ReserveAvailable Water
RFU : Réserve utile facilement disponible
RHmax : humidité relative maximale
Ri : Réserve en eau du sol au jour i
Ri-1 : Réserve en eau du sol au jour i-1

RN : Route Nationale
Rn : rayonnement net
Rnl : Grande longueur d'onde
Rns : Courte longueur d'onde
RO : Ruissellement
RU : Réserve utile
SMD : Déficit de la réserve utile d'eau dans le sol
TAM : Eau disponible totale
TAW : Total Available Water
Tmax : Température maximale
Tmin : Température minimale
USDA : United States Department of Agriculture
UTC : Temps universels coordonné
 u_2 : Vitesse du vent à 2m d'altitude
Z : Profondeur des racines
 θ_{FC} : Eau contenue au maximum dans le champ
 θ_{WP} : Eau contenue au point de flétrissement
 Δ : Pente de la courbe des pressions de vapeur
Ya : Rendement réel
Ym : Rendement maximal
Yr : Diminution de rendement par rapport au rendement en condition optimale de culture
 γ : Constante psychrométrique

Introduction

INTRODUCTION

Le sorgho est la cinquième céréale mondiale par le volume de production, après le maïs, le riz, le blé et l'orge. C'est la principale céréale pour de nombreuses populations à faible revenu vivant dans les régions tropicales semi-arides d'Afrique et d'Asie. Cette plante est aussi la sixième source de calories alimentaire pour la population mondiale, après le riz, le blé, le sucre (de betterave et de canne), le maïs et la pomme de terre. Elle est également largement utilisée en alimentation animale sous forme de fourrage vert, de paille sèche ou de concentré de céréales. Les Etats-Unis viennent au premier rang avec 16,2 % de la production mondiale, devant le Mexique (12,4 %), le Soudan (10,7%), le Nigeria (9,9 %) et l'Inde (7,9 %). [1]

Le sorgho était une culture autrefois très répandue au Sud de Madagascar. C'était une filière vivrière traditionnelle de l'Androy et aussi un aliment très apprécié, avant sa disparition il y a quelques années, suite aux attaques répétées de foreurs de tiges et à l'évolution de la pluviométrie limitant le rendement de la variété locale à cycle long. Cette céréale a été réintroduite sous l'impulsion d'un projet de l'Union Européenne à cause de sa contribution à la sécurité alimentaire et le lutte contre la malnutrition ainsi que la pauvreté.

Notre étude sera focalisée sur la « CONTRIBUTION A L'ETUDE AGROCLIMATOLOGIE DE LA CULTURE DU SORGHO DANS LES REGIONS D'ANDROY&ANOSY EN UTILISANT LE MODELE CROPWAT 8.0 ». Une analyse estimative des besoins en eau et en irrigation, ainsi que la saison humide à l'aide de modèle de recherche de la FAO et le calendrier cultural seront effectués afin d'améliorer le rendement du sorgho.

Cet ouvrage sera divisé en trois grandes parties : la première sera consacrée aux généralités sur la zone d'étude et sur le sorgho. La seconde partie traitera l'aspect méthodologique qui concerne les données utilisées ainsi que la présentation du modèle. Enfin la dernière partie va présenter les résultats obtenus à partir du modèle, les interprétations et les discussions

PARTIE 1.GENERALITES

CHAPITRE 1 Présentation de la zone d'étude

1.1 Localisation

1.1.1 Limites géographiques

Le lieu de la zone d'étude se situe dans les Régions d'Androy et d'Anosy, limitée par les coordonnées géographiques suivantes :

- Latitude : entre 25°58 et 23°74 de latitude Sud
- Longitude : entre 44°58 et 47°41 de longitude Est

Elle est bordée de toute part par les régions environnantes dont :

- Au Nord par la région d'Ihorombe
- A l'Ouest par la région d'AtsimoAndrefana
- A l'Est par la région d'AtsimoAntsinanana

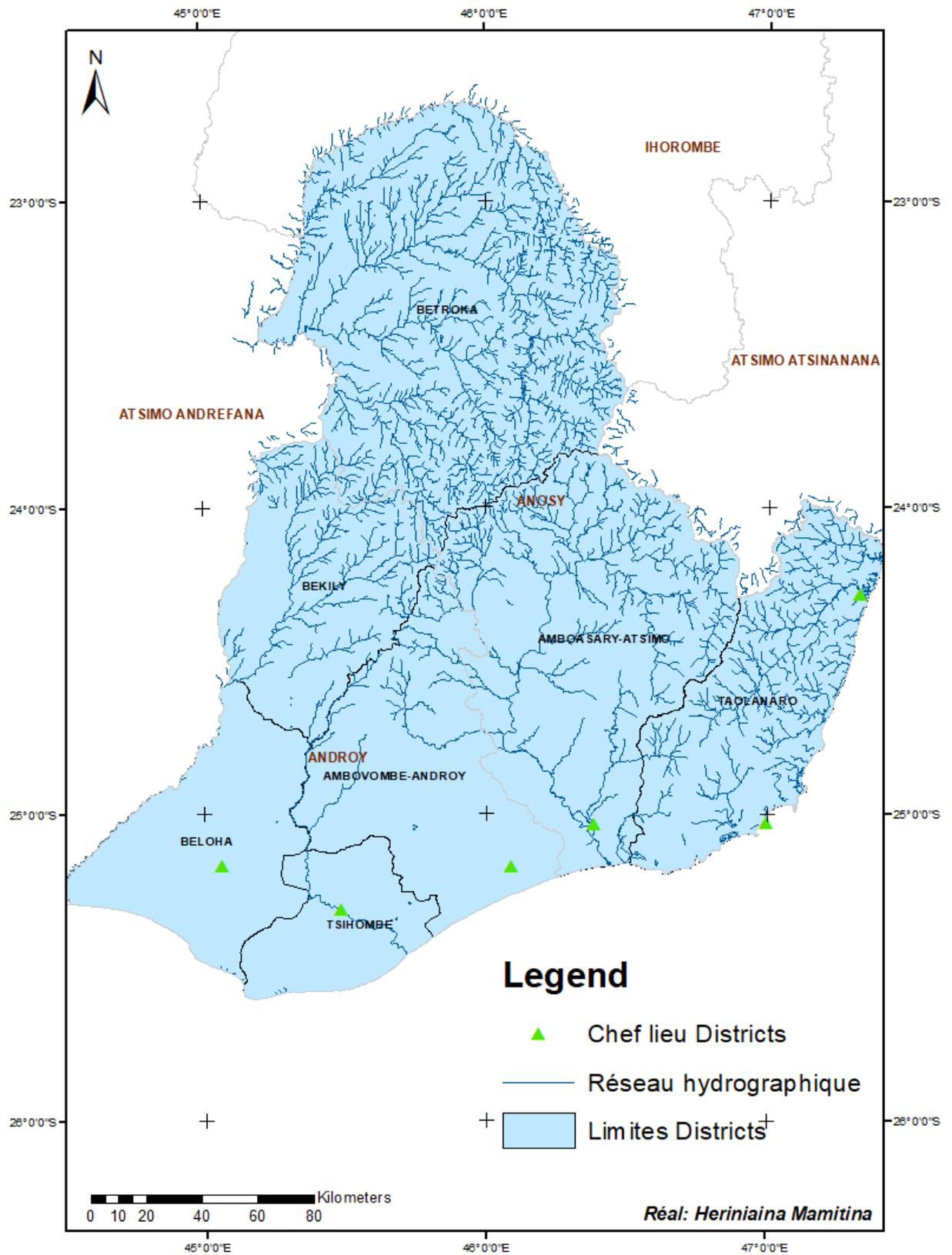


Figure 1- Délimitation: Région Androy & Région Anosy

1.1.2 Position par rapport à la mer

- Seule la sous-préfecture de Bekily est enclavée.
- Les cinq autres sous-préfectures ont chacune une façade maritime (Océan Indien ou Canal du Mozambique) avec 400 km de côte.

1.1.3 Position par rapport à Antananarivo et Toliara

- A plus de 1 000 km d'Antananarivo,
- A 350/650 km de Toliara, respectivement par RN10 et RN7 + RN13.

1.1.4 Les districts des deux régions (découpage)

- L'Androy: Ambovombe - Tsihombe - Beloha - Bekily,
- L'Anosy: Taolagnaro et Amboasary Sud

1.1.5 Répartition de la superficie pardistrict

Districts	Superficie (km ²)	Pourcentage
Taolagnaro	5 498	16%
AmboasarySud	10 173	29%
Ambovombe	6 514	19%
Tsihombe	2 513	7%
Beloha	5 016	14%
Bekily	5 274	15%
Total de la région	34 988	100%

Tableau 1- Répartition de la superficie par district

Source :[2]

1.2 Géologie

La Région est divisée en deux zones géologiques:

- L'Androy, qui est pour l'essentiel sur le socle cristallin précambrien. Il est recouvert à l'Est par les basaltes du massif volcanique de l'Androy, et à l'Ouest et au Sud par des dépôts quaternaires (sables roux et blancs et formations dunaires au Sud d'Ambovombe);

- L'Anosy (Taolagnaro) est formé de roches granitiques avec des sols ferralitiques.

Quatre sortes de roches sont rencontrées dans cette partie de l'île :

- Roches volcaniques (bassin du Mandrare) ;
- Sable le long du littoral androyen ;
- Alluvion le long des fleuves Mandrare et Menarandra ;
- Les concrétions et cuirasses, dans les massifs de l'Ivakoana et les chaînes anosyennes.

On rencontre surtout du granite, granite migmatiteet migmatite granitoïde. Le soubassement cristallin est constitué par des roches plus tendres (schistes, paragneiss recouverts par des épandages de matériaux sableux).

1.3 Climat

1.3.1 Le réseau de stations météorologiques

Le dispositif du Service Météorologique compte une dizaine de stations de divers types. Pour les besoins de l'agrométéorologie, le système d'avertissement antiacridien et le système d'alerte précoce ont été complétés par d'autres stations équipées au moins de pluviomètres.

Voici le tableau de liste des stations météorologique :

Nom station	Sous prefectures	Latitude Sud	Longitude Est	Altitude (m)	Type
Faux-Cap	Tsihombe	25° 33'	45° 32'	22	Station automatique
Taolagnaro-Aéroport	Taolagnaro	25° 02'	46° 57'	9	Station Aéronautique
Ambondro	Ambovombe	25° 13'	45° 50'	100	Station pluviométrique
Behara	Amboasary-Sud	24° 57'	46° 23'	55	Station pluviométrique
Bekily	Bekily	24° 13'	45° 19'	400	Station climatologique
Beloha	Beloha	25° 10'	45° 03'	100	Station climatologique

Tableau 2- Liste des stations météorologiques

Source : Service Météorologique

La seule station «complète » dans le Sud est celle de l'aérodrome de Taolagnaro, gérée par l'ASECNA à des fins aéronautiques. Certains paramètres comme l'ETP ne l'intéressent pas. Cette station est mal située, car elle est à l'extrême Sud-Est de la région. Ses indications reflètent grossièrement les conditions climatiques de la partie Est des sous-préfectures.

1.3.2 Vents

VENTS DOMINANTS

- Alizé du Nord-Est à Est pour les Sous-préfectures de Taolagnaro, pendant presque toute l'année.
- Vent du Sud : amène toujours la pluie

ANDROY

- Alizé : vent Sud-Est à Sud, très desséchant
- Vent du Nord-Ouest : pluvieux

Le vent du Sud-Est est un phénomène redouté dans l'Androy pour les cultures, car source d'érosion éolienne importante et cause d'aggravation de l'ETP.

Nom du vent	Signification	Provenance
Tiopoty	Vent blanc	Vient de l'Est, desséchant
Tiomena	Vent rouge	Vent d'Est qui dessèche tout ; souffle de septembre à décembre
Tiobaratra	Vent du Nord	Ce vent amène la pluie et souffle du Nord-Ouest en saison des pluies.

Tableau 3- différents vents d'Androy

1.3.3 Régions climatiques

ZONE SEMI-ARIDE TROPICALE

- Entre isohyètes 400 et 600 mm ;
- entre le fleuve Mandrare à l'Est et le Menarandra à l'Ouest,.

ZONE TROPICALE SECHE

- entre isohyètes 700 et 900 mm ;
- Hautes-terres Bara et Haut Mandrare, aux reliefs très tourmentés, lessivés et dégradés.

ZONE TROPICALE HUMIDE

- isohyète 1 000 à 2 000 mm ;
- coincée entre l'Océan Indien et les crêtes des montagnes Anosyennes, zones rizicoles et de cultures pérennes.

On constate qu'en allant du nord vers le sud la pluviométrie diminue ainsi que le ruissellement; par contre le déficit en eau du sol augmente.

1.4 Hydrologie

Le réseau hydrographique du Sud se divise en 3 parties distinctes.

1.4.1 Réseau de l'Androy

- La Menarandra (180 km) constitue la limite Ouest de l'Androy. Il prend sa source dans la zone cristalline au Sud d'Isoanala. Cette rivière est à sec 5 mois sur 12. Ses nombreux petits affluents ne coulent que pendant la saison des pluies.
- La Manambovo, une petite rivière qui passe à Tsihombe est à sec 9 mois sur 12. Elle a une longueur de 100 km.

1.4.2 Réseau du Mandrare

Le Mandrare (250 km), qui passe à Amboasary, est un des rares fleuves du Sud à être permanent. Néanmoins, pendant la grande sécheresse de 1991, il ne subsistait de ce fleuve qu'un inféoflux. Il prend sa source dans la montagne de Beampingaratra (1.967 m). Ses nombreux affluents naissent tous dans la zone cristalline haute du Massif de l'Ivakoana et des versants ouest des chaînes anosyennes. Ses principaux affluents sont : l'Andratina, le Tsivory, le Manambolo, la Mananara. C'est la seule rivière utile sur le plan agricole, car émaillée de nombreux petits barrages.

1.4.3 Les rivières de la Côte-Est

Manampanihy, Ebakika, Vatomirindra, Esama . Ce sont des rivières inexploitable sur le plan agricole. Ce sont plutôt des obstacles qui entravent considérablement la circulation entre Taolagnaro, Manantenina et Vangaindrano.

1.4.4 Caractéristiques des bassins versants

1.4.4.1 Menarandra à Tranoroa

- Surface du bassin versant jusqu'à la mer : 83,0 km²
- Surface du bassin versant en amont de la station : 5 300 km²
- Débit maximal de crue observé au cours de la période : 3 750 m³/s
- Débit d'étiage absolu au cours de la période d'observation : 0,04 m³/s
- Débit moyen annuel ou module observé au cours de la période : 30 m³/s

1.4.4.2 Manambovo à Tsihombe

- Surface du bassin versant en amont de la station : 3 710 km²
- Débit d'étiage absolu : 0
- Débit maximal de crue : 1 450 m³/s
- Débit moyen annuel ou module observé : 5 m³/s

1.4.4.3 Mandrare

- S = 12 570 km² (jusqu'à la mer)
- Surface bassin versant en amont de la station : 12 435 km²
- Débit d'étiage absolu à cours de la période d'observation = 0
- Débit maximal de crue : 7 200 m³/s
- Débit moyen annuel : 65 m³/s

Globalement, seul le fleuve Mandrare, par l'intermédiaire de ses affluents, ont une utilité agricole, en saison de pluies.

1.5 Température

La température moyenne annuelle dans la Région se situe autour de 23°C et 24°C.[3]

Station	Latitude	Altitude(m)	T° moyenne annuelle (°C°)	T° moyenne mois le + frais(°C°)	T° moyenne mois le + chaud (°C)
Ambovombe	25°11	135	22°9	18°5	26°4
Amboasary	25°02	40	24°7	15°	28°7
Beloha	25°10	100	24°2	15°3	28°0
Tsihombe	25°18	64	24°1	15°4	27°8

Tableau 4: Température moyenne

1.6 Sols et végétations

1.6.1 Sols

D'une façon générale, les sols sont particulièrement pauvres, peu ou pas humifères. Les sols ferrugineux tropicaux formés sur roches métamorphiques, couvrant de vastes surfaces, sont le plus souvent des sols squelettiques, superficiels, d'une faible valeur agricole et pastorale.

- De l'embouchure de la Menarandra, en passant par le Cap Ste Marie, jusqu'à proximité d'Antaritarika : des sols peu évolués sur roches sableuses.
- Du plateau Karimbola, en passant par tout le sud d'Ambovombe : un complexe sol ferrugineux tropicaux et sols rouges méditerranéens.
- Dans les Sous-préfectures de Tsihombe vers le Nord, de Bekily, d'Amboasary (tout ce qui est à l'Est de la route Amboasary - Tsivory) : un complexe sol ferrugineux tropicaux et peu évolués.
- Dans toutes Communes de la Sous-préfecture de Taolagnaro : sols ferralitiques jaune/rouge ; sols ferralitiques rouges ; association sols ferralitiques jaune/rouge.

- Le long des rivières Mandrare et Menarandra : sols peu évolués alluviaux plus ou moins hydromorphes.
- Massif volcanique de l'Androy : sols sur roches volcaniques.

Les sols sont très fragiles et sensible à l'action mécanique du vent. Dans le cas de l'Androy un alizé du Sud-Est (vent dominant et desséchant) augmente considérablement l'ETP.

Avec le climat semi-aride à aride (sauf dans la région de l'Anosy) le type de sol dispose d'une végétation assez spéciale.

1.6.2 Végétations

LES FOURRES A DIDIERACEES ET EUPHORBES DE L'ANDROY

Il est caractérisé par une hauteur variable d'espèces de 2 m de haut jusqu'aux petits arbres de 3 à 4 m. La plus connue des euphorbes est l'Euphorbia Stenoclada (famata) : elle a une grande importance en cas de grande sécheresse ; elle est utilisée comme substitut de boisson pour les zébus. Ensuite, on peut citer les espèces appartenant à la famille des didiéracées : Didiera, Alluaudiaprocera (fantsilitsé) utilisé pour la construction et comme bois de caisserie. Au sein de cette formation, on rencontre des baobabs comme

AndasoinaZa et Fony, Alse Suzannae (8 à 10 m de hauteur), Pachypodium (Apocynacées) à troncs très charnus et gorgés d'eau. L'arbre tout entier est recouvert d'épines.

LA SAVANE

Vers le nord (Androy cristalline), on rencontre une savane arbustive à base de Poupartiacaffra (Sakoa), à côté duquel est toujours associé Flacourtiaindica (Lamoty) et le Celastruslinéaris (Tsingilofilo). La plaine côtière est couverte de végétations à base de Stenotaphrum et d'Exonepus. Ce sont des savanes et steppes à Aristida.

1.7 Agriculture

Globalement, les terres cultivables sont très limitées et leur exploitation semble atteindre le seuil de saturation. Les surfaces cultivées ne représentent que 3% de la superficie totale de la Région.

Les causes en sont les suivantes :

- dans les zones humides, les montagnes occupent une grande partie de la surface et on rencontre peu de sol utile pour l'agriculture.
- dans les zones côtières, le sol est inculte
- dans l'Androy sédimentaire (sud Ambovombe, Tsihombe, Beloha) qui bénéficie d'un climat influencé par l'humidité marine, les terres cultivables sont exploitées au maximum
- dans l'Androy cristalline, il y a peu de terre fertile sauf au niveau des périmètres irrigués.

Le climat aride et semi-aride et les caractéristiques peu fertiles du sol conditionnent le développement de l'agriculture.

Trois types de culture sont rencontrés dans l'ensemble de la Région :

- ✓ Cultures vivrières composées principalement par le riz, manioc et le maïs
- ✓ Cultures industrielles représentées par la canne à sucre et l'arachide
- ✓ Cultures de rente essentiellement le café et le sisal

CHAPITRE 2 Généralités sur le sorgho

Famille : **Graminées**

Nom latin : **Sorghum**

Nom malagasy : **Apemby**

2.1 Buts de la culture

Le SORGHO est surtout cultivé pour son grain utilisé pour l'alimentation de l'homme et du bétail (sorgho à grains). En outre, sa hampe florale dépouillée de ses grains sert à faire des balais (sorgho à balais), sa moelle sucrée sert à l'obtention de sucre (sorgho sucré) la gaine de ses feuilles, ses glumes et sa moelle rouge donnent des pigments utilisés comme teintures (sorgho tinctorial) ; ses feuilles sont utilisées comme fourrage (sorgho fourrager) ses tiges comme matière première pour la fabrication du papier (sorgho papetier), etc.... Les grains fermentés servent à la préparation d'un alcool (bière). Enfin, le sorgho est également utilisé comme engrais vert.[4]



Figure 2-Plante de sorgho[4]

2.2 Botanique

2.2.1 Description

➤ Racines

Elles sont fasciculées et prennent naissance sur les entre-nœuds très courts de la base des tiges. Elles sont minces et portent de fines radicelles.

Elles ont de 25 à 30 cm de long et forment un chevelu très important. Certaines d'entre elles atteignent 1,5m de profondeur.

➤ Tiges

Elles sont cylindriques, droites et pleines. Elles sont formées d'entre-nœuds séparés par des nœuds. Elles ont de 0,80 à 5m de haut et de 1 à 4cm de diamètre. Leur couleur est verte, généralement, plus ou moins colorée de rouge selon les variétés. Au niveau de chaque nœud on distingue un bourgeon qui peut donner naissance à des tiges secondaires et tertiaires sur les nœuds de la base (tallage). Une touffe peut comprendre de 1 à 10 tiges suivant les variétés. Au bout de 3 à 6 mois, suivant les variétés, chaque tige donnera une panicule terminale. Si on coupe les tiges, les nœuds de la base peuvent repousser et fournir une seconde récolte. Si on ne coupe pas les tiges, des ramifications apparaissent sur les nœuds supérieurs de ces tiges et elles peuvent donner des panicules de petite dimension.

➤ Feuilles

Elles sont alternes, longues et engainantes. Elles ont 50 à 80 cm de long et 5 à 10 cm de large. Elles sont vertes, parfois colorées en rouge. Les nervures sont parallèles. Tiges et feuilles peuvent contenir de l'acide cyanhydrique très toxique pour les animaux : " la dourine ". On a cependant constaté que ce produit toxique apparaissait surtout dans les gourmands, dans les repousses et dans les tiges de sorgho qui ont subi un arrêt de croissance par suite d'une sécheresse normale.

➤ Fleurs

Chaque épillet contient 1 ou 2 fleurs enfermées dans les deux glumes de l'inflorescence. Une seule fleur est en général fertile. Elle est insérée dans ses deux glumelles et comprend 3 étamines, 1 ovaire à 1 loge surmonté de 2 styles à stigmates plumeux. La fleur stérile est réduite à une membrane qui se trouve sous la glume inférieure. La fécondation est directe, rarement croisée.

➤ Fruits

C'est un caryopse de 4 ou 5mm de long qui reste entouré, de ses glumes à maturité. Il est plus ou moins rond ou allongé selon les variétés et sa couleur varie du blanc au noir en passant par le jaune, le rouge et le brun. Il contient de l'amidon. Les grains sont totalement dépourvus d'acide cyanhydrique. 1000 grains pèsent entre 15 et 45g.[4]

2.2.2 Classification

Tous les sorghos cultivés peuvent se classer en 6 groupes que se différencient par leurs inflorescences et leurs épillets :

- **Groupe Drummondil** : qui comprend des sorghos à tallage réduit, de faible hauteur et donnent des petits grains.
- **Groupe Guineense**: qui comprend presque tous les sorghos cultivés pour leur grain en Afrique.
- **Groupe Nervosum**: comprend également des sorghos cultivés pour leur grain en Afrique.
- **Groupe Dochna**: qui comprend des sorghos dont les panicules ont de 40 à 70 cm de long et à grains très petits. Ce sont les sorghos à balais.
- **Groupe Durra**: qui comprend des sorghos cultivés pour leur grain en Afrique du Nord, en Asie, etc...
- **Groupe Caffrorum**: qui comprend des sorghos cultivés pour leurs grains et comme fourrage en Afrique du Sud et aux États-Unis.

Parmi les espèces spontanées, il faut signaler le Soudan-grass cultivé comme fourrage dans de nombreux pays. La sélection des sorghos porte surtout sur leur résistance à la sécheresse et à la verse ainsi que la durée de leur cycle végétatif qui doit être court (100 à 120 jours).

On a également créé des hybrides à grand rendement dans plusieurs pays du Monde.[5]

2.2.3 Phase végétative

Phase de germination

- Le grain germe au bout de 24 heures après semis.
- La levée a lieu 4 à 5 jours après le semis dans des conditions normales d'humidité du sol, Sinon cette levée n'aura lieu qu'après plusieurs semaines. La racicule apparaît la première puis la tige et les feuilles. De nouvelles racines apparaissent sur la base de la tige (racines adventives). Une fois la levée effectuée, le jeune sorgho peut résister très fortement à la sécheresse en attendant le retour de l'humidité.

Phase de tallage

Les racines adventives s'accroissent.

Les nœuds de la base de la tige principale donnent naissance à des tiges secondaires ou talles qui apparaissent par paire.

Les nœuds de la base des tiges secondaires peuvent donner à leur tour, dans certains cas, naissance à des tiges tertiaires. Mais ceci est très rare dans les conditions écologiques du Sud de Madagascar.

Phase d'épiaison et de floraison

Une fois entièrement développées, les tiges émettent chacune une panicule (de 50 à 80 jours après le semis).

5 jours, en moyenne, après l'apparition de la panicule à l'extérieur, la floraison est terminée et la fécondation a lieu

Phase de maturation

45 à 70 jours après la fécondation, la pleine maturité des grains est acquise

La durée du cycle végétatif est très variable selon les variétés.

95 à 115 jours pour les variétés hâtives

115 à 130 jours pour les variétés demi-hâtives

130 à 180 jours pour les variétés tardives.

A Madagascar, on cherche à cultiver essentiellement les variétés hâtives ou demi-hâtives.[5]

2.3 Ecologie

2.3.1 Besoins en chaleur

Le sorgho est exigeant au point de vue température. Il redoute le froid humide. Pour germer, il lui faut de 10 à 15°C. Pendant la durée de sa végétation, l'optimum se situe vers 30° - 32°C.

La température ne doit pas descendre au-dessous de 23°C. Le sorgho résiste aux températures élevées même durant les périodes de sécheresse.

2.3.2 Besoins en eau

À cause de sa petitesse, le grain de sorgho n'a pas de gros besoins en eau pour germer, il peut rester en terre plusieurs semaines sans germer en attendant une humidité suffisante. Dès que le sorgho a formé son système racinaire, il résiste fort bien à la sécheresse. Ceci s'explique par le peu de surface foliaire de la plante (ce qui limite l'évaporation) et par le pouvoir qu'elle possède d'arrêter sa croissance. La seule période critique pour l'eau est l'épiaison. Le manque d'eau à ce moment précis provoque l'avortement des panicules. Il faut 500 à 700mm d'eau

pour le sorgho durant la durée de son développement. Dans les conditions d'Ambovombe, le sorgho précoce arrive à maturité avec une pluviométrie de 200mm seulement durant leur cycle végétatif (mi-décembre à mi-avril). Cependant, il y a des condensations nocturnes dont il est très difficile d'évaluer l'importance. [7]

2.3.3 Besoins en lumière

Le sorgho est une plante de lumière qui ne peut pas pousser normalement à l'ombre.

2.3.4 Besoins en sol

Le Sorgho demande des sols argilo-sableux, un peu humifères, à pH légèrement acide et contenant de l'azote et de potasse. Il redoute l'eau stagnante, les sols trop lourds et les sols légers.

2.3.5 Besoins en altitude

Si les autres besoins écologiques sont satisfaits, le sorgho peut être cultivé du niveau de la mer jusqu'à 1100 à 1300mm.

2.4 Culture

2.4.1 Multiplication

Le sorgho se multiplie par semis-direct. C'est une plante annuelle qui peut repousser après la récolte.

Dans certains pays, on pratique le repiquage des plants provenant des pépinières. Ils ont alors 20 cm de hauteur. Néanmoins, dans le sud de Madagascar, cette pratique est à rejeter et il faut ressemer.

2.4.2 Préparation du sol

Elle peut se faire, soit à plat soit en buttes

Pour la préparation du sol à plat, on réalise un labour de 25 - 30 cm de profondeur suivi d'un pulvérisage pour briser les mottes. Lors de ce labour, on enfouit le fumier. On laisse le sol se reposer durant 15 jours environ avant de faire le semis. Juste avant le semis, on herse le sol, pour avoir une terre bien pulvérisée et on enfouit un insecticide pour lutter contre les Hétéronychus. Si on craint l'inondation, cette préparation du sol devra être complétée par un billonnage.

Pour la préparation du sol en buttes (dans les zones à faible pluviométrie) on réalise des petits tas de terre de 20 à 25 cm de haut et de 30 à 40 cm de diamètre.

Les buttes sont espacées de 70 cm en tous sens. Il y a ainsi 20.000 buttes environ à l'ha. Sur les sols en pente, les buttes devront être plus larges et plus hautes (6000 à 7000 buttes à l'hectare).

Dans tous les cas, cette préparation du sol se fera dès les premières pluies (début décembre en général).

2.4.3 Choix et préparation des semences

Choisir une variété de sorgho en tenant compte des exigences en sols et en pluviométrie, de la durée de son cycle végétatif, de la qualité de ses grains et de son rendement

Nettoyer les semences de la variété choisie pour éliminer les matières étrangères et surtout les graines des mauvaises herbes

Traiter les semences avec des fongicides de synthèse pour lutter contre les principales maladies cryptogamiques et avec des insecticides pour protéger les jeunes plantations contre les attaques des insectes présents autour des grains dans le sol.

2.4.4 Mode de semis

En poquets, en lignes ou à la volée

- Pour le semis en poquets, on recommande d'espacer les poquets de 50 à 80 cm en tous sens (15.000 à 40.000 poquets à l'hectare.) Dans chaque poquet, on place 4 à 10 grains.
- Pour le semis en lignes, réaliser des espacements de 60 cm et sur ces lignes, on place 4 à 6 grains tous les 25 à 35 cm (système dit de la ligne discontinue).
- Les semis à la volée sont de plus en plus abandonnés car ils ne permettent pas un bon entretien des cultures.

2.4.5 Quantité de semences

- Semis en poquets : 8 Kg à l'ha environ
- Semis en lignes : 5 à 6 Kg à l'ha environ
- Semis à la volée : jusqu'à 45 Kg à l'ha[9]

2.4.6 Profondeur de semis

On recommande 2cm de profondeur

2.4.7 Entretien

- Sarclage : dans la première quinzaine qui suit le semis pour détruire " les mauvaises herbes
- Remplacement des manquants : dans la première quinzaine qui suit le semis, soit par resemis, soit par repiquage des plants provenant des poquets très fournis.
- Démariage : à deux plants par poquet. Il a lieu en même temps que le sarclage et le remplacement des manquants.
- Second sarclage : les plants ont 50 à 60 cm de hauteur (1 mois après le premier sarclage)
- Buttage : lors de ce second sarclage
- Troisième sarclage : parfois, pour les variétés tardives.

2.4.8 Fertilisation

Fumure organique : 15 à 20 T de fumier de ferme à l'ha. Enfouies lors du labour.

Fumure minérale : L'azote est le pivot de la fumure du Sorgho. Pour produire 2 tonnes de grain à l'hectare, on estime qu'il faut apporter suivant les situations 35 à 45 Kg/ha de N.

Cet azote n'est complètement valorisé que si les quantités de phosphore disponibles pour la plante sont suffisantes et cela dépend de la richesse du sol en cet élément. Pour le même niveau de production de 2T/ha de grain, une fumure d'entretien correcte se situe entre 20 et 30 Kg/ha de P₂O₅.

Le complément potassique dépendra de la richesse du sol en cet élément et de la quantité de paille restituée, sous quelque forme que ce soit : enfouissement direct, compost, fumier, poudrette.

Pour les hybrides, en culture irriguée, il faut prévoir : N : 70kg/ha ; P₂O₅ = 35 kg/ha ; K₂O = 100 kg/ha. L'engrais doit être épandu de préférence à la volée, avant les façons de préparation du sol, en particulier avant le labour pour qu'il soit mis directement à la disposition des racines. S'il n'y a pas de travail du sol, il doit être épandu au semis. Ces fumures minérales ont pour but essentiel d'augmenter la production mais elles n'assurent pas toujours le maintien de la fertilité du sol.

2.5 Récolte et rendement

La récolte peut débuter dès que les grains de la base des panicules sont durs. Une récolte trop tardive peut conduire à un égrenage spontané des panicules et à une détérioration du grain.

On couche les tiges et on coupe les panicules au couteau. Les panicules coupées sont alors rassemblées en meules de 1 à 1,5m de haut, ces meules étant placées sur des plates-formes surélevées par rapport au niveau du sol.

Les rendements en grains varient de 5 à 10 quintaux/ha dans l'Androy, mais ils peuvent atteindre 35 quintaux/ha avec des variétés sélectionnées et bien adaptées aux conditions écologiques du lieu de culture. Avec le sorgho hybride, on peut avoir 75 quintaux à l'hectare de grains.

Les rendements en fourrage pour le sorgho fourrage sont de l'ordre de 250 qtx/ha en matière verte.

2.6 Maladies et ennemies

2.6.1 Maladies

- Charbons : dus à des champignons qui attaquent les panicules en ne laissant subsister que des fragments d'épillets et qui se reproduisent par une grande quantité de spores noires
- Rouilles : dues à des champignons qui provoquent des taches jaunes ou pourpres de quelques millimètres de long sur les feuilles
- Anthracnose : due à un champignon qui provoque des taches brunes sur les feuilles.
- Maladies mineures : Cercosporiose, bactéroïse, etc...

2.6.2 Ennemis

- Noctuelle du cotonnier : la chenille détruit les jeunes plantules.
- Noctuelles diverses : les chenilles rongent les feuilles
- Pucerons : piquent les feuilles et sucent les suc.
- Sauterelles : rongent les feuilles et les jeunes tiges.
- Borers : les larves creusent des galeries dans les tiges.
- Heteronychus divers : coléoptères qui rongent le collet des jeunes plants
- Diptères apodes : les larves creusent des galeries dans les tiges et il se produit un développement des pousses latérales.
- Oiseaux : mangent les grains
- Rats : mangent les grains
- Bruches : rongent l'intérieur des grains emmagasinés
- Charançons : rongent l'intérieur des grains emmagasinés.[10]

- Pyrales : les chenilles creusent des galeries dans les grains emmagasinés

2.7 Valeur alimentaire des grains de sorgho

- amidon : 70%
- eau : 13%
- protides : 10%
- lipides : 3%
- cellulose : 2%
- matières minérales : 2%

Il n'y a pas encore de règles précises à Madagascar concernant la commercialisation des grains ou de la farine de sorgho. Cette culture n'est pas encore assez développée à l'heure actuelle.

SYNTHESE

Les régions Androy et Anosy sont composées de 6 districts situées à l'extrême Sud-Est de Madagascar, dans la province autonome de Toliara. Elles couvrent 34 988 km² soit 22% de la superficie de la Province et 6 % du territoire national. Ces deux entités sont dissemblables tant par le relief et le paysage que par le climat et la végétation. L'aridité est caractéristique de la Région, Mandrare constitue le seul fleuve d'importance. La nature s'adapte à la sécheresse et les activités agricoles ou pastorales sont conditionnées par la pluviométrie. Le sorgho était une culture autrefois très répandue en Androy, et un aliment très apprécié. C'est une plante naturellement résistante en condition de stress hydrique. Cette tolérance provient à la fois de sa grande capacité à extraire l'eau du sol avec un système racinaire puissant mais également à sa capacité de régulation stomatique (gestion de l'évapotranspiration). Cependant, il existe des différences variétales.

PARTIE 2.METHODOLOGIE

CHAPITRE 3 Présentation du modèle

3.1 Modèle CROPWAT 8.0

CROPWAT 8.0 For Windows, un modèle conçu par la FAO. Il permet de calculer des besoins en eau des cultures, des plans d'irrigation et des besoins en eau d'un périmètre à partir des données climatiques moyennes décennales, des données concernant la culture et les sols. Le modèle CROPWAT est disponible gratuitement sur le site de la FAO, plusieurs versions existent (sous MS-DOS ; Windows). Actuellement, il est à sa version CROPWAT sous Windows, pour notre étude nous avons utilisé la version CROPWAT 8.0 For Windows.[11]

3.2 Rôle et avantage du logiciel

C'est un logiciel qui fait l'analyse de données pluviométrique, climatique. Il peut être utilisé dans le suivi de tout type de culture (cultures saisonnières, annuelles) pourvu que les données soient disponibles pendant tout le cycle cultural. Il est aussi adapté tant pour les systèmes de production traditionnels que modernes. Ce logiciel ne nécessite pas une maîtrise en détail des concepts de physiologie végétale, de nutrition minérale, etc. Il s'agit tout simplement d'une compréhension des phénomènes d'échanges dans la trilogie sol-plante-atmosphère. Le logiciel CROPWAT présente aussi d'autres avantages. En ce qui concerne l'importation et l'exportation d'informations, il constitue une interface d'échange avec plusieurs systèmes d'exploitation (Ms Excel, MS Word, et Bloc-notes). Les données qui sont importées dans le logiciel sont préalablement traitées dans ces logiciels et enregistrées aux formats et extensions convenus tels : crc, sch, pdf, doc et copie presse papier vers un tableur comme Ms Excel au format xls ce qui représente une très forte opportunité par le fait que ce sont des logiciels populaires et très utilisés.

3.3 Fonctionnement du modèle et les données d'entrées

Le fonctionnement de base du logiciel CROPWAT repose sur quelques variables. Toutes ces variables s'articulent autour du bilan hydrique qui s'écrit de façon générale comme suit :

$$R_i = R_{i-1} + P_{eff} + Irr - D - ET_m \quad \text{Avec}$$

R_i : Réserve en eau du sol au jour i (mm)

R_{i-1} : Réserve en eau du sol au jour $i-1$ (mm)

P_{eff} : Précipitation efficace (mm)

Irr : Apport de l'irrigation (mm)

D : Drainage

ETm : évapotranspiration maximale

Le drainage correspond à la quantité d'eau qui sort de notre système en s'infiltrant vers les nappes profondes ou l'eau y circule par écoulement souterrain. Dans notre programme, cette quantité n'est pas prise en compte donc nous considérerons qu'elle est égale à 0.

L'ETm correspond à l'évapotranspiration maximale d'une culture donnée. Le modèle considère que l'ETm est égale à la CWR. En effet, si nous considérons la quantité d'eau stockée dans la plante, celle-ci est très faible par rapport à ce qui est évapotranspiré.

3.3.1 Structure du Programme

Le programme CROPWAT est organisé en huit modules différents, dont cinq sont des modules d'entrée et trois des modules de calculs. Ces modules sont accessibles par le menu principal mais plus aisément par la barre Modules qui est visible en permanence sur le côté gauche de la fenêtre principale. Ceci permet à l'utilisateur de combiner aisément des données climatiques, culturales et pédologiques pour le calcul des besoins en eau des cultures, des calendriers d'irrigation et d'approvisionnement du périmètre. Les modules d'entrée de données de CROPWAT sont :

- **Climat/ETo:** pour l'entrée de données ETo mesurées *ou* de données climatiques qui permettent le calcul de EToPenman-Monteith;
- **Précipitations :** pour l'entrée de données précipitations et le calcul des précipitations efficaces ;
- **Culture :** pour l'entrée de données culturales et des dates de plantation ;
- **Sol :** pour l'entrée des données sol (seulement nécessaire pour le calendrier d'irrigation);
- **Assolement :** pour l'entrée de données assolement nécessaire pour les calculs d'approvisionnement du périmètre.

Les modules de calcul de CROPWAT sont :

- **Besoins en eau :** pour calculer le besoin en eau des cultures ;
- **Calendrier :** pour le calcul des calendriers d'irrigation ;
- **Périmètre :** pour le calcul de l'approvisionnement du périmètre basé sur un assolement spécifique.

3.3.2 Modules et formules utilisées

- Climat/ETo

Ce module peut être sélectionné en cliquant sur l'icône Climat/ETo dans la barre Modules située à gauche de la fenêtre principale de CROPWAT. La fenêtre de données s'ouvrira avec le format de données par défaut pour cette catégorie ; il est possible de changer rapidement de format en utilisant la liste déroulante du bouton Nouveau de la barre d'outils. Les formats de données pour ce module sont :

- EToPenman-Monteith par mois ;
- EToPenman-Monteith par décade ;
- EToPenman-Monteith par jour ;
- ETo mesurée par mois ;
- ETo mesurée par décade ;
- ETo mesurée par jour

Le module Climat/ETo qui permet en premier lieu d'entrer des données requiert des informations de la station météorologique (pays, nom, altitude, latitude et longitude) et des données climatiques. Ces informations peuvent être entrées par mois, décade ou jour. Pour les paramètres climatiques, CROPWAT a besoin de la Température, mais des données sur l'Humidité, la Vitesse du vent et l'insolation peuvent être utilisées si elles sont disponibles. Le module inclut également le calcul à la fois du rayonnement et de l'évapotranspiration de référence (ETo) en utilisant l'approche FAO de Penman-Monteith.

D'où ETo peut calculer en utilisant de la formule de Penman-Monteith qui s'écrit :

$$ETo = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + y \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + y(1 + 0.34u_2)}$$

Avec

ETo : Evapotranspiration de référence (mm/j)

R_n : Rayonnement net à la surface de la culture (MJ/m²/j)

G : Flux de chaleur échangé avec le sol (MJ/m²/j)

T : Température journalière à 2m d'altitude (°C)

u₂ : Vitesse du vent à 2m d'altitude. (m/s)

e_s : Pression de la vapeur à saturation (kPa)

e_a : Pression réelle de la vapeur (kPa)

$e_a - e_s$: Déficit de la pression de vapeur à saturation (kPa)

Δ : Pente de la courbe des pressions de vapeur (kPa/°C)

γ : Constante psychrométrique (kPa/°C)

- Précipitation

Ce module peut être sélectionné en cliquant sur l'icône Précipitations de la barre Modules située à gauche de la fenêtre principale de CROPWAT. Cette fenêtre de données s'ouvrira avec le format de données par défaut de ces données. Il est possible de changer directement de format de données en utilisant la liste déroulante du bouton Nouveau de la barre d'outils.

Autrement dit, on peut utiliser le bouton Nouveau dans le menu Fichier; un sous-menu permet de sélectionner le type des nouvelles données et le format de ces données à entrer. Les formats de données disponibles dans ce module sont :

- par mois ;
- par décade ;
- par jour

Le module Précipitations sert en premier lieu à entrer des données. L'information requise porte sur la pluviométrie sur une base journalière, décadaire ou mensuelle. Ce module inclut également des calculs qui fournissent les données de Précipitations efficaces en utilisant une des approches disponibles. Il peut être sélectionné en cliquant sur Options dans la barre d'outils lorsque le module Précipitations se trouve dans la fenêtre active.

CROPWAT 8.0 offre la possibilité d'utiliser plusieurs méthodes pour calculer les précipitations efficaces.

Dans notre cas, on utilise la formule de l'USDA –SCS:

- pour des précipitations inférieures à 250mm :

$$P_{eff} = \frac{P_{tot} \times (125 - 0.2 \times P_{tot})}{125}$$

Avec

P_{eff} : Précipitation efficace (mm)

P_{tot} : Précipitation totale (mm)

➤ Pour des précipitations supérieures à 250 mm :

$$P_{eff} = 125 + 0.1P_{tot}$$

- Culture

Ce module peut être sélectionné en cliquant sur l'icône Culture de la barre Modules située sur la gauche de la fenêtre principale de CROPWAT. La fenêtre de données s'ouvrira avec le format de données par défaut pour ces données ; il est possible de changer rapidement le format de données en utilisant la liste déroulante du bouton Nouveau de la barre d'outils. Autrement dit, on peut utiliser le bouton Nouveau dans le menu Fichier. Un sous-menu permet la sélection du type de données et du format de données à entrer. Le module Culture sert en premier lieu à faire entrer des données. L'information requise porte sur les données culturelles relatives aux différentes phases de développement.

- Sol

Ce module est activé en cliquant sur l'icône Sol dans la barre Modules située sur la gauche de la fenêtre principale de CROPWAT. Autrement, il peut être ouvert en utilisant la liste déroulante du bouton Nouveau de la barre d'outils. Un unique format de données est disponible pour les cultures. (Annexe VIII, tab 1). Le module Sol qui permet d'abord l'entrée de données requiert les paramètres suivants :

- Eau totale disponible (TAM) en millimètre par mètre ;
- Taux d'infiltration maximum en millimètre par jour ;
- Profondeur d'enracinement maximum en centimètre ;
- Épuisement de la teneur en eau du sol initial en %. Ce module inclut également des calculs fournissant la teneur en eau du sol initiale

- Besoin en eau des cultures

Le module « Besoins en eau » des cultures peut être activé en cliquant sur l'icône « Besoins en eau » dans la barre Modules située sur la gauche de la fenêtre principale de CROPWAT.

Le module « Besoins en eau » des cultures inclut des calculs fournissant les besoins en eau d'irrigation d'une culture sur une base décadaire pour toute la durée de la saison de

développement. Ces besoins d'irrigation sont obtenus à partir de la différence entre l'évapotranspiration et les Précipitations efficaces.

Le module « Besoins en eau » permet la présentation des données dans un graphique en choisissant le « Graphique » dans la barre d'outils pendant que le module « Besoins en eau » se trouve dans la fenêtre active.

On calcule le besoin en eau par la formule suivante :

$$ETm = ETo \times Kc$$

Avec

ETm : Evapotranspiration maximale (mm)

ETo : Evapotranspiration potentielle (mm)

Kc : Coefficient cultural (sans dimension)

- Calendrier

Ce module peut être activé en cliquant sur l'icône « Calendrier » dans la barre Modules située sur la gauche de la fenêtre principale de CROPWAT. Le module « Calendrier » comporte essentiellement des calculs, qui fournissent le Bilan hydrique du sol par jour. Ceci permet de :

- Développer des calendriers d'irrigation indicatifs pour améliorer la gestion de l'eau ;
- Évaluer les pratiques d'irrigation actuelles et les productivités en eau des cultures correspondantes ;
- Évaluer la production des cultures en pluvial et examiner la faisabilité d'une irrigation d'appoint ;
- Développer des programmes alternatifs de distribution d'eau dans des conditions d'approvisionnement en eau restreint.

- Assolement

Le module Assolement peut être sélectionné en cliquant sur l'icône Assolement de la barre Modules située sur la gauche de la fenêtre principale de CROPWAT. Autrement dit, il est possible d'utiliser la liste déroulante du bouton Nouveau dans la barre d'outils ou encore il est possible d'utiliser le bouton Nouveau dans le menu Fichier.

- Fichier Culture : CROPWAT 8.0 possède des données culturelles pour plusieurs cultures courantes prises dans les publications FAO (les Bulletins d'Irrigation et de Drainage No. 56 "Évapotranspiration des cultures" et No. 33 "Réponse du rendement à

l'eau"). Ces liens requièrent une connexion Internet. Les données culturelles les plus fiables demeurent cependant les données obtenues dans les stations de recherche agricoles locales.

- Date de plantation : elle est, en général, déterminée par les conditions climatiques et les pratiques agricoles locales. La date de plantation des cultures, en particulier celles qui couvrent des surfaces importantes ou qui ont de fortes demandes en eau. Afin de faciliter l'analyse, la culture peut être subdivisée dans CROPWAT en plusieurs unités culturelles avec des intervalles de date de plantation de 10 à 15 jours. Ce procédé est utile pour l'étude de différents assolements et le calcul des programmes d'approvisionnement en eau des périmètres. La date de récolte est calculée automatiquement en fonction de la date de plantation ou début de l'activité de développement de la plante et de la durée totale du cycle de la culture.
- Surface : c'est la superficie des zones réservées à chaque culture, en pourcentage de la surface totale cultivée. Il faut s'assurer qu'à aucun moment, la somme des cultures ne dépasse 100 % de la surface totale du périmètre.

- Périmètre

Le module Approvisionnement du périmètre peut être sélectionné en cliquant sur l'icône Périmètre de la barre Modules située sur la gauche de la fenêtre principale de CROPWAT. Le module Périmètre inclut essentiellement des calculs, fournissant :

- Les besoins en irrigation pour chaque culture du périmètre ;
- Les besoins nets en irrigation du périmètre ;
- La surface irriguée en pourcentage de la surface totale ;
- Les besoins en irrigation pour chaque surface existante.

L'irrigation requise correspond à la différence entre l'évapotranspiration réelle et les précipitations efficaces.

$$Irr_{req} = ETm - P_{eff}$$

Avec

Irr_{req} : irrigation requise (mm)

ETm : Evapotranspiration maximale (mm)

P_{eff} : Précipitation efficace (mm)

Calcul de l'irrigation requise

L'irrigation requise correspond à la différence entre l'évapotranspiration réelle et les précipitations efficaces.

$$Irr_{req} = ETm - P_{eff}$$

Avec

Irr_{req} : irrigation requise (mm)

ETm : Evapotranspiration maximale (mm)

P_{eff} : Précipitation efficace (mm)

Calcul de l'alimentation en eau du champ(FWS)

$$FWS = 1hectare \times Irr_{req} \times (100 \times Irr_{eff})$$

Avec

Irr_{req} : irrigation requise (mm)

Irr_{eff} : Efficacité de l'irrigation (%)

Calcul de la réserve utile (TAM ou RU)

$$RU = 1000 \times (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \times z$$

Avec

RU : Réserve utile (mm)

θ_{FC} : Eau contenue au maximum dans le champ (m^3/m^3)

θ_{WP} : Eau contenue au point de flétrissement (m^3/m^3)

Z : Profondeur des racines (m)

Le point de flétrissement étant la teneur en eau du sol au-dessous de laquelle les plantes se flétrissent.

Calcul de la réserve facilement utilisable (RAM)

$$RFU = RU \times P$$

Avec

RFU : Réserve utile facilement disponible (mm)

RU : Réserve totale disponible (mm)

P : Tarpissement admissible

Calcul du déficit de la réserve utile dans le sol (SMD)

$$SMD_i = SMD_{i-1} - P_{eff} - Irr + ETc$$

Avec

SMD_i : Tarpissement de la réserve du sol à la date i (mm)

SMD_{i-1} : Tarpissement de la réserve du sol à la date i-1 (mm)

P_{eff} : Précipitation efficace à la date i (mm)

Irr : Irrigation (mm)

ETc : Evapotranspiration de la culture à la date i (mm)

Calcul de la diminution de rendement

$$Yr = \left(1 - \frac{Ya}{Ym}\right) \times 100$$

Avec

Yr : Diminution de rendement par rapport au rendement en condition optimale de culture (%)

Ya : Rendement réel (tonne/an)

Ym : Rendement maximal (tonne/an)

$$Yr = \left(1 - \frac{ETc}{ETm}\right) Ky$$

Avec Ky : Coefficient de réponse du rendement (sans dimension)[12]

3.4 Les sorties du modèle

3.4.1 *Table climatique :*

Cette table rassemble toutes les données climatiques, plus les valeurs de la radiation solaire et de l'évapotranspiration standard ou ETo qui ont été calculées par le logiciel. Il est bon de noter qu'une seule valeur par mois est calculée.

3.4.2 *Table des besoins en eaux des cultures*

Cette table regroupe toutes les données concernant les cultures et les pluies. Sur cette table, nous trouvons également reportées les valeurs de l'évapotranspiration standard, le rappel de la proportion de surface occupée par le type de culture et l'évolution du Kc en fonction de la date.

3.4.3 *Table du programme d'irrigation*

Cette table rassemble toutes les propriétés du sol :

- la réserve utile (RU) qui correspond à la quantité théorique maximale d'eau à la disposition de la plante.
- la réserve facilement utilisable (RFU), qui correspond à la valeur théorique d'eau qui est facilement disponible dans le sol pour la plante.
- la pluviométrie
- l'évapotranspiration réelle de la plante ou ETc, qui est calculé par le logiciel. Le rapport ETc / ETm permet de déterminer si la plante est en stress hydrique. Figure 3: Histogramme d'évapotranspiration ou non. Quand ce rapport est égal à 100%, la plante est dans les conditions optimales de développement. En revanche plus le stress hydrique augmente plus cette valeur diminue.
- le déficit de la réserve utile d'eau dans le sol (SMD).

3.5 Organigramme globale du modèle CROPWAT

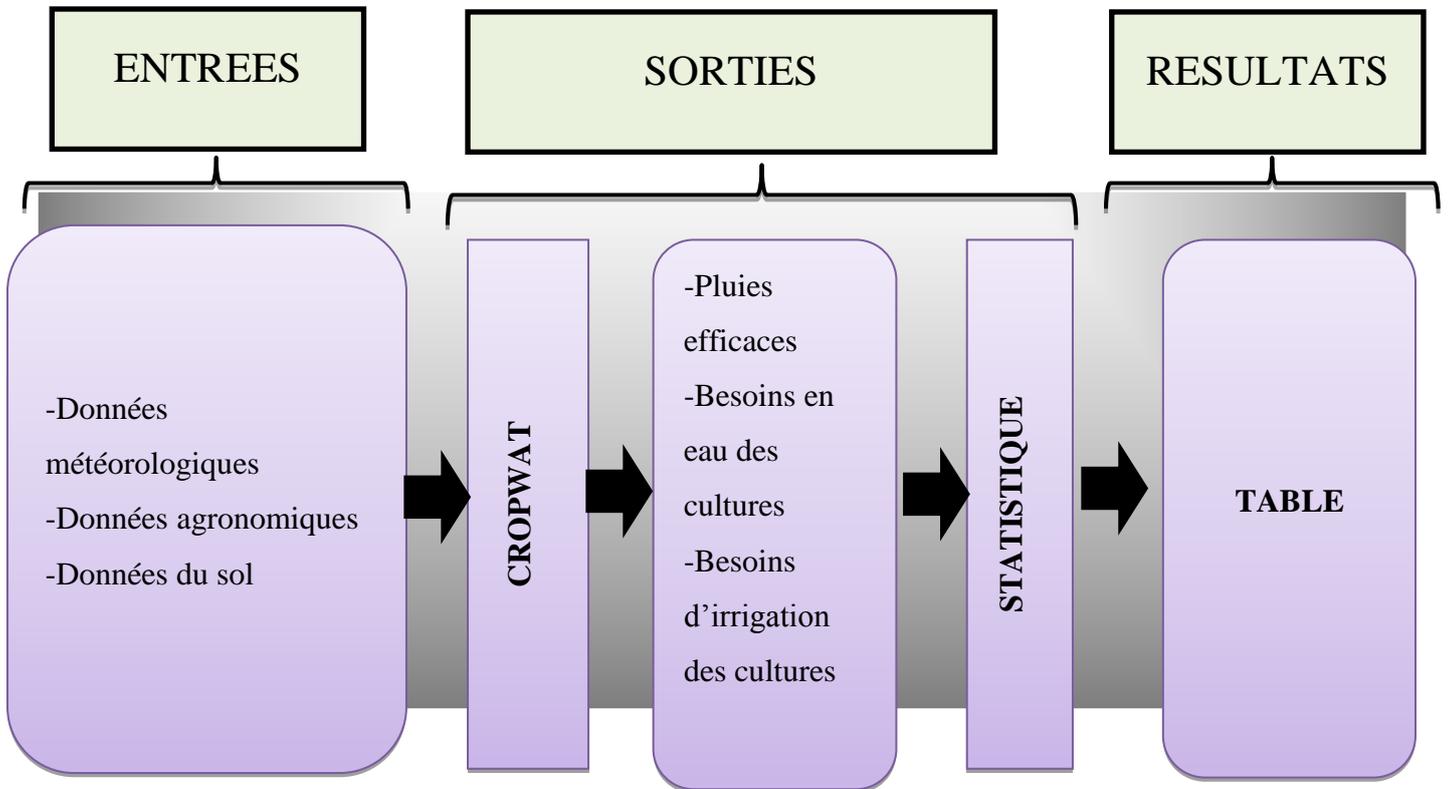


Figure 4: Organigramme globale du modèle CROPWAT

CHAPITRE 4 Description des données

4.1 Evapotranspiration potentielle ou ETP

Il s'agit de l'évapotranspiration potentielle normale décadaire ou mensuelle, disponible dans la base de données du Service de la Météorologie Agricole au sein de la DGM.

4.2 Pluviométrie

Les données pluviométriques sont venues des stations de Taolagnaro ; d'Ambosary Sud ; d'Ambovombe ; de Tsihombe ; de Beloha et de Bekily qui peuvent être de la forme journalière ou décadaire ou mensuelle, disponibles dans la base de données du Service de la Météorologie Agricole au sein de la DGM.

4.3 Données agronomiques

Les données agronomiques concernent :

- La date de plantation
- Le coefficient cultural (K_c)
- La profondeur d'enracinement
- La fraction d'épuisement maximum (p)
- Le facteur de réponse du rendement (K_y)

Le modèle CROPWAT possède déjà des modules de cultures intégrées permettant des données agronomiques pour chaque type de culture sauf la date de plantation qui sera spécifiée par l'utilisateur.

4.4 Microsoft office Excel

Cet outil informatique est utilisé pour traiter les données d'entrées et les résultats du modèle CROPWAT. La préparation des données d'entrées dans le modèle CROPWAT est faite à l'aide de Microsoft Office Excel. La présentation des résultats du modèle CROPWAT est réalisée aussi par ce logiciel Microsoft Office Excel qui peut être sous la forme courbe ou sous la forme d'histogramme

SYNTHESE

Toutes les données climatiques utilisées dans notre étude sont des données réelles et normales collectées dans la station d'Antsirabe. Les données agronomiques et les données relatives au sol sont fournies par le modèle CROPWAT suivant le type de culture et le type du sol demandé. CROPWAT est un outil simple et facile à utiliser et il peut faire l'étude sur les interactions entre le sol, la plante et l'atmosphère.

PARTIE 3.TRAITEMENTS DES DONNEES ; ANALYSES ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS

CHAPITRE 5 Résultats obtenues

Dans notre étude, les données de trente dernières années des six stations pluviométriques ont été examinées.

5.1 Evapotranspiration de référence ETo

L'évapotranspiration estimée pour chaque stade, varie selon la méthode appliquée. Elle est presque similaire durant le stade initial et le stade final, cependant on note des différences entre les traitements durant la deuxième et le troisième stade, mais elles sont très apparentées notamment au cours de la croissance végétative des plants (formation de nouvelles feuilles).

Pour la caractérisation du besoin en eau de la culture du sorgho, nous avons retenu les données d'évapotranspiration ETo au service météorologique relevée au niveau de six stations dans les régions d'Androy et d'Anosy. Ces résultats donnent un aperçu sur les caractéristiques climatiques (températures, évaporation, pluviométrie et éclaircissement) qui influent sur l'estimation de l'ETo. La figure 5 ci-dessous résume les valeurs mensuelles moyennes des évapotranspirations relevées au niveau de ces six stations dans ces deux régions.

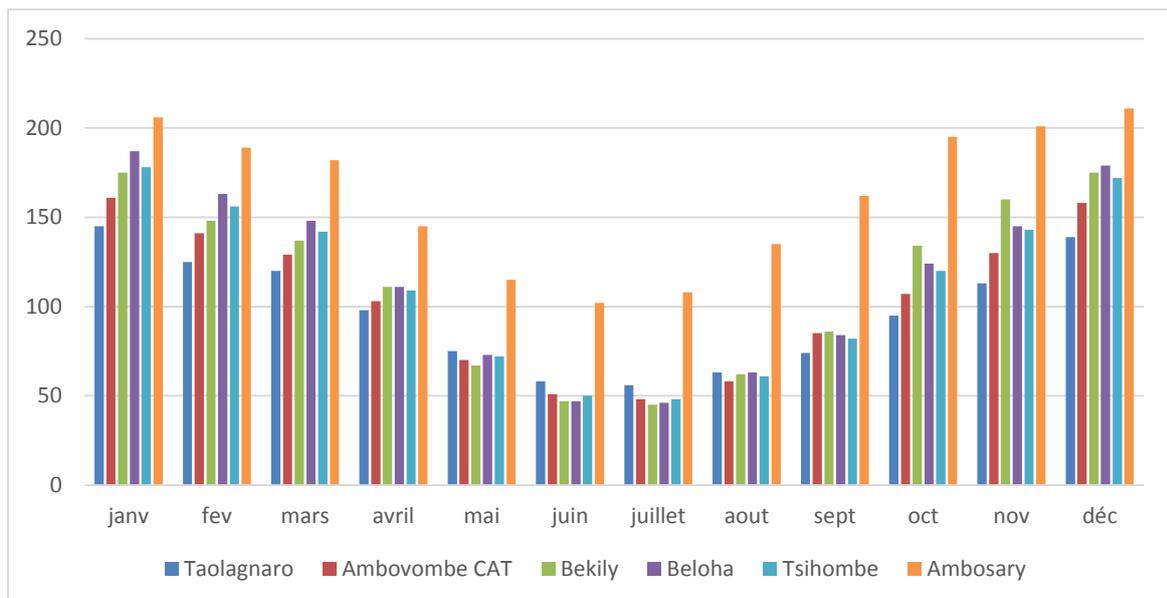


Figure 5: Histogramme d'évapotranspiration réelle

En général, cette figure nous montre que la quantité maximale d'évapotranspiration réelle est dans le district d'Ambosary, environ 1951 mm par an, et la quantité maximale d'évapotranspiration réelle des cinq autres districts des deux régions sont presque similaires. D'après l'analyse de cette figure, on peut dire que l'évapotranspiration potentielle diminue aux mois de mai à avril, et durant les mois de Janvier et de décembre, elles sont les plus élevés.

5.2 Précipitations efficaces

Elle représente la fraction des précipitations qui est effectivement utilisée par la culture après déduction des pertes par ruissellement de surface et par percolation profonde. Pour le calcul des précipitations efficaces. Différentes méthodes ont ainsi été développées, chacune prenant en compte le climat de la région où doivent s'effectuer les mesures.

Ainsi, le modèle CROPWAT propose plusieurs modèles de calcul de la pluie efficace qui sont détaillés dans le Bulletin FAO-25, nous avons choisi de travailler avec la méthode l'USDA, c'est une formule recommandée par United States Département of Agriculture - Soil Conservation Service.

Pour calculer les pluies efficaces, CropWat utilise la formule suivant pour des précipitations inférieures à 250mm :

$$P_{eff} = \frac{P_{tot} \times (125 - 0.2 \times P_{tot})}{125}$$

La figure suivante montre la variation des résultats des précipitations efficaces de chaque station des régions d'Androy et d'Anosy en utilisant le modèle CROPWAT. Elles sont obtenues à partir des valeurs décennales.

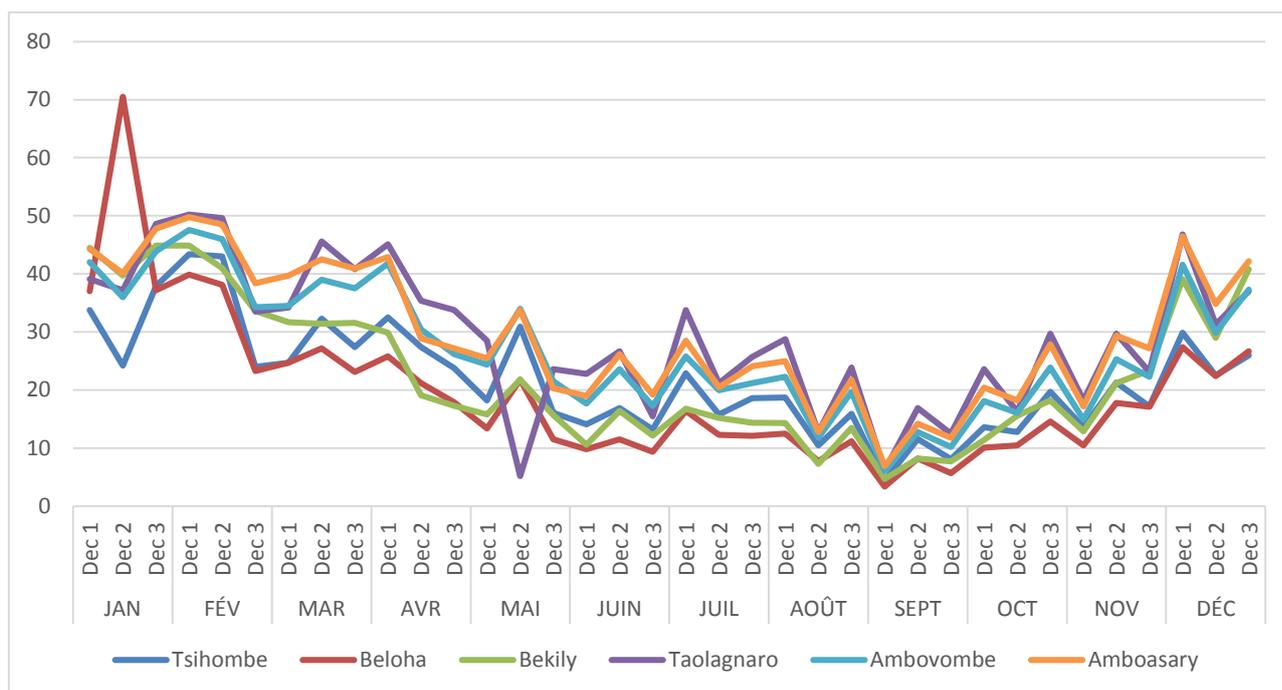


Figure 6: Précipitation efficace des six stations

D'après cette figure, la quantité de la précipitation efficace augmente pendant les mois de janvier à Avril ainsi que l'octobre à décembre, pourtant elle est plus faible par rapport à la moyenne à Madagascar. Elle s'atténue entre le mois de mai à septembre. L'analyse de cette figure explique aussi que la quantité minimale de précipitations efficace dans les deux régions se trouve au mois de septembre, celle du janvier est le plus élevé.

5.3 Besoins moyens en eau de la culture

Tout d'abord, la détermination des besoins en eau d'une culture nécessite la connaissance de divers paramètres concernant aussi bien la plante elle-même que les données climatiques ou pédologiques de la région.

- les données climatiques donneront les indications nécessaires concernant les besoins en eau de la culture ;
- les paramètres pédologiques permettront d'estimer la réserve en eau utile du sol ;
- les données culturelles préciseront la réserve en eau facilement utilisable par la plante.

A l'aide des différents résultats obtenus, il sera relativement aisé de déterminer par la suite les quantités d'eau d'irrigation nécessaires au bon développement de la plante. D'après le traitement de donnée de besoin en en eau obtenue à partir du logiciel CROPWAT sur la feuille d'Excel. Les courbes suivant nous montrent l'estimation du besoin en eau dusorghopour les six stations d'Androy et Anosy.

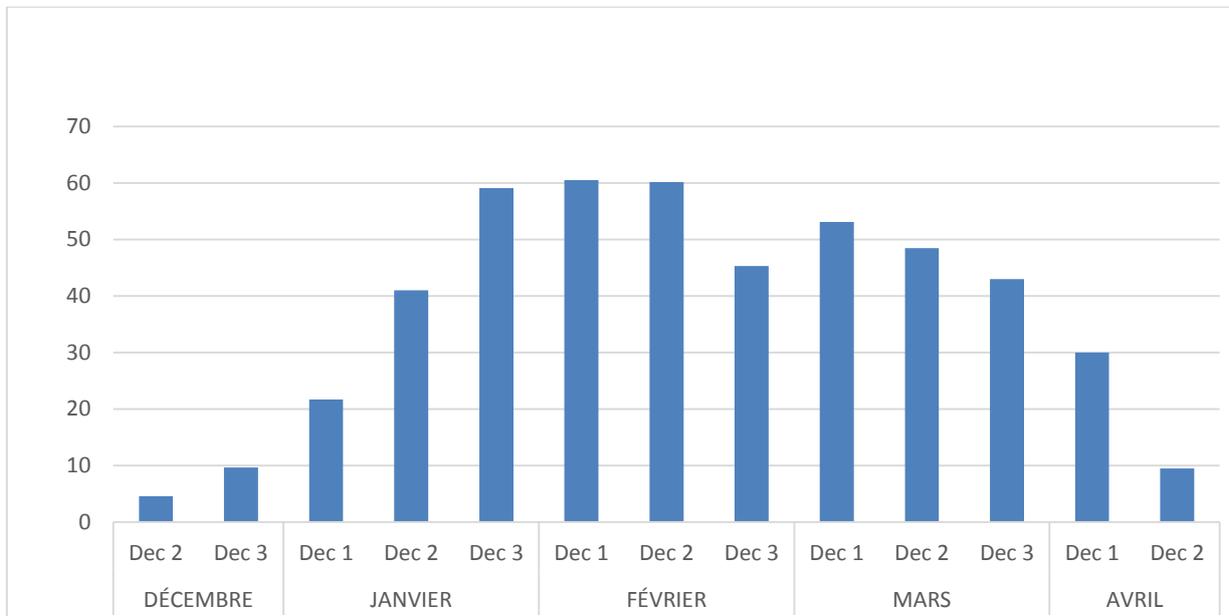


Figure 7: Besoin en eau décadaire du sorgho à la station de Tsihombe

Cette courbe montre la variation de besoin en eau du sorgho dans le district de Tsihombe. On conclue que le besoin en eau totale est environ 486.2mm. Après la plantation, dans les quatre premières décades, on voit une tendance d'augmentation jusqu'au 7ième décade, il s'atténue jusqu'à la récolte. La valeur minimale se trouve au première décade après la plantation, cette phase s'appelle la Phase de germination ou Phase de tallage. Le besoin maximal est lieu au 6em décade qui est la phase de floraison.

Voici pour les stations de Beloha, Bekily, Amboasary, Taolagnaro et Ambovombe

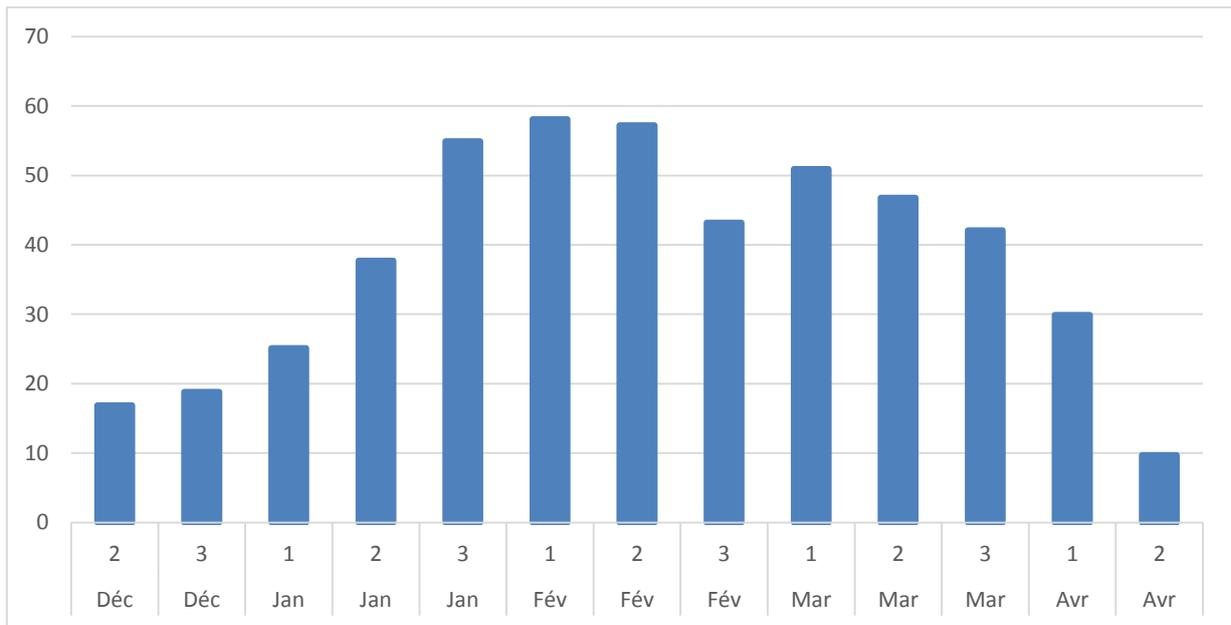


Figure 8: Besoin en eau décadaire du sorgho à la station BELOHA

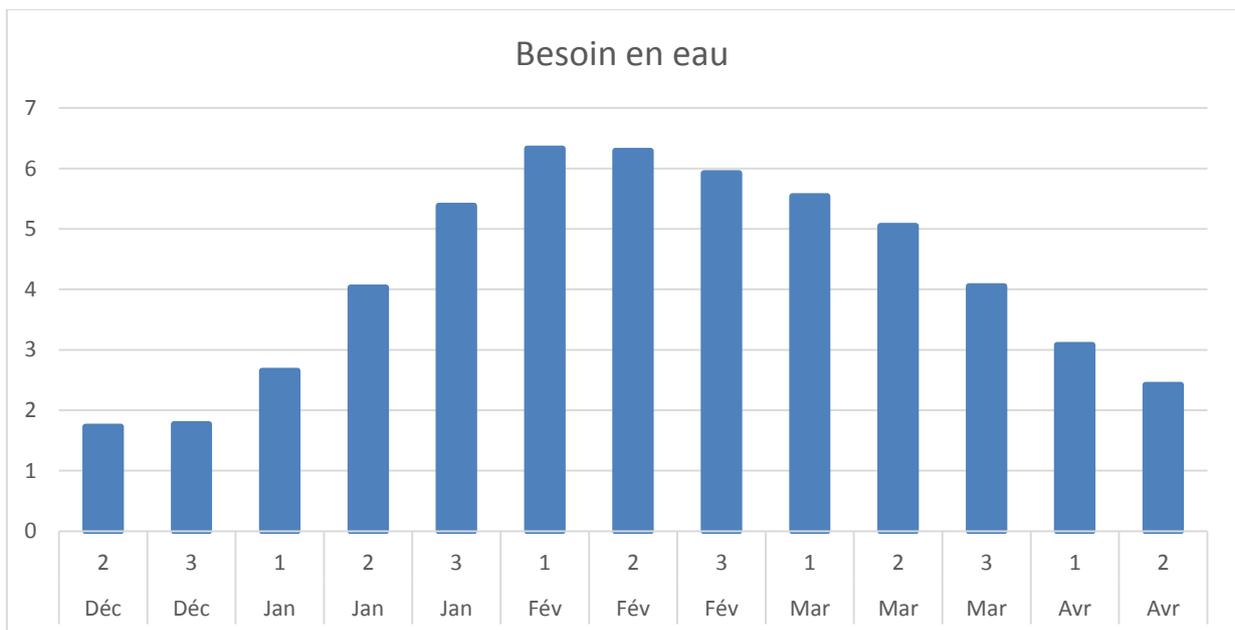


Figure 9: Besoin en eau décadaire du sorgho à la station BEKILY

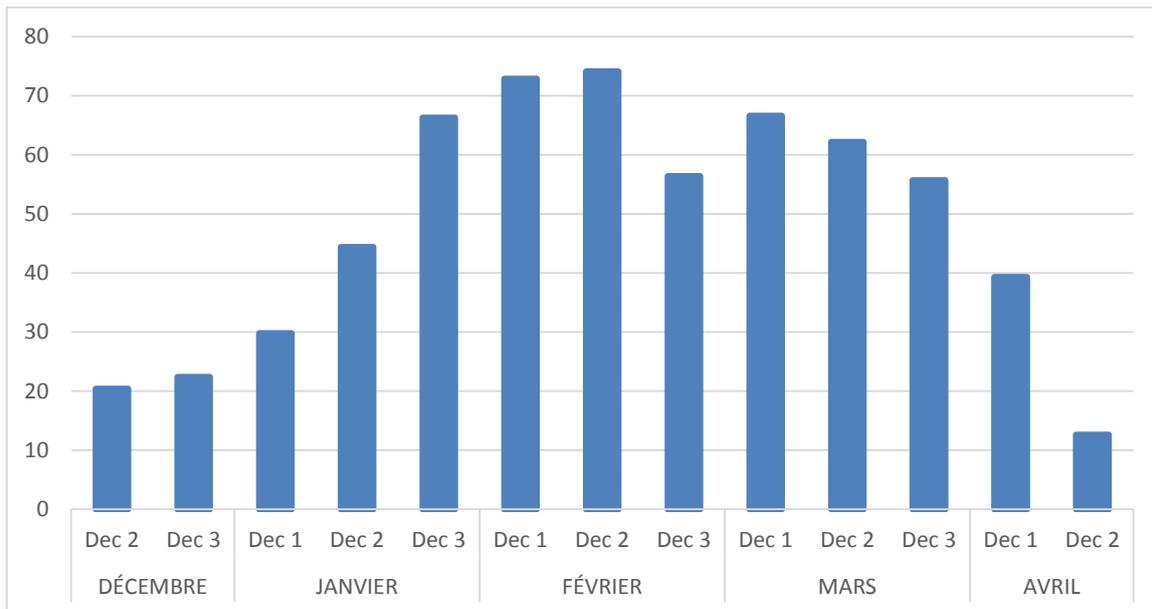


Figure 10: Besoin en eau décadaire du sorgho à la station d'Amboasary

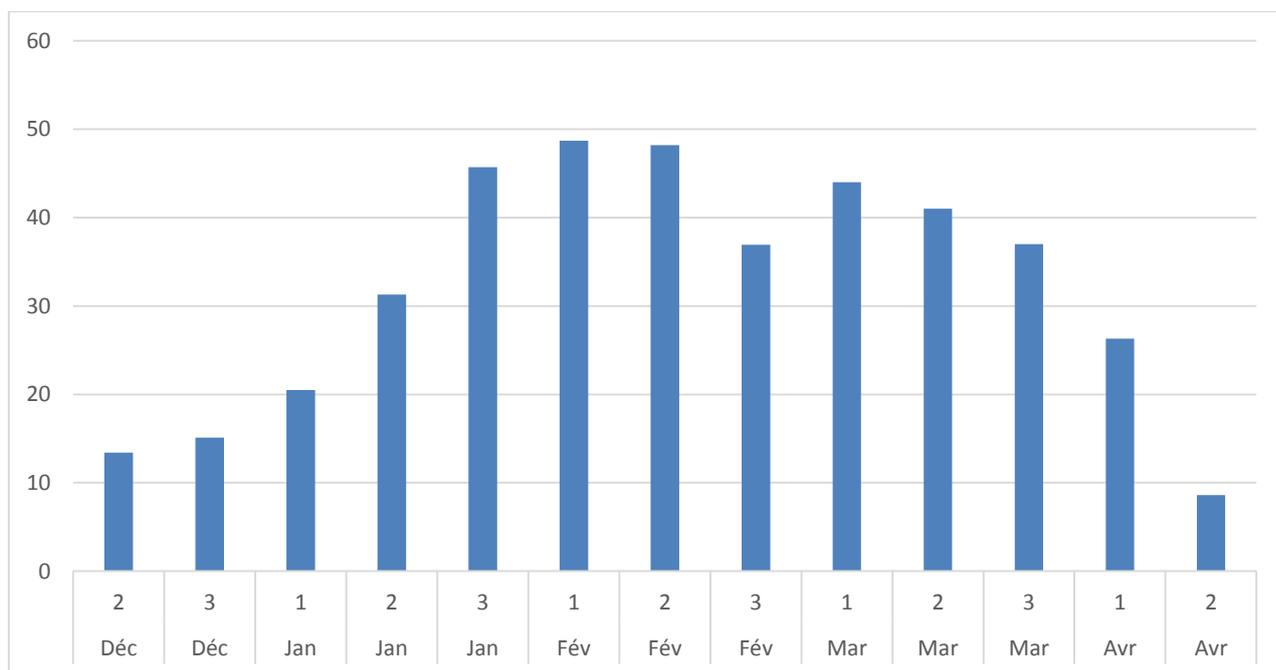


Figure 11: Besoin en eau décadaire du sorgho à la station TAOLAGNARO

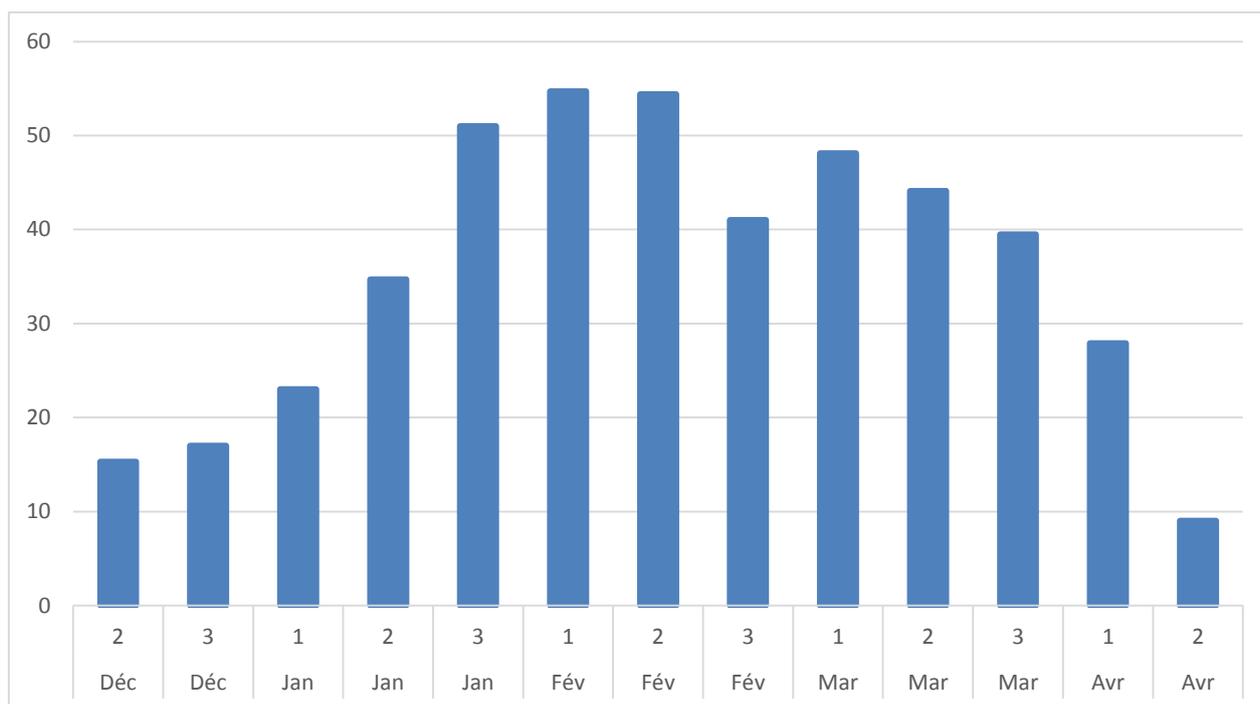
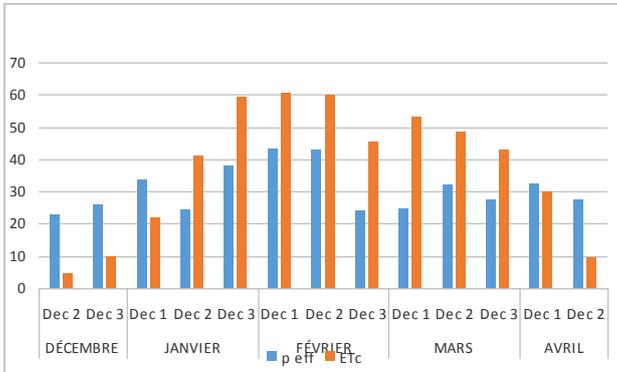


Figure 12: Besoin en eau décadaire du sorgho à la station AMBOVOMBE

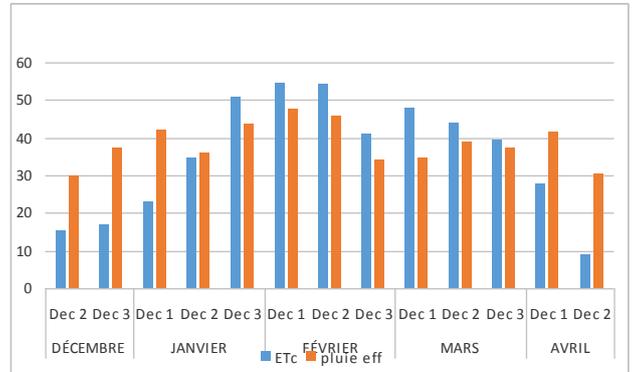
Les besoins en eau moyenne du sorgho pour les six stations sont presque similaires. La somme pendant un cycle cultural varie entre 416,7 mm à 623,2mm. En générale, le besoin en eau du sorgho est faible par rapport aux autres cultures vivrières.

5.4 Besoin irrigation

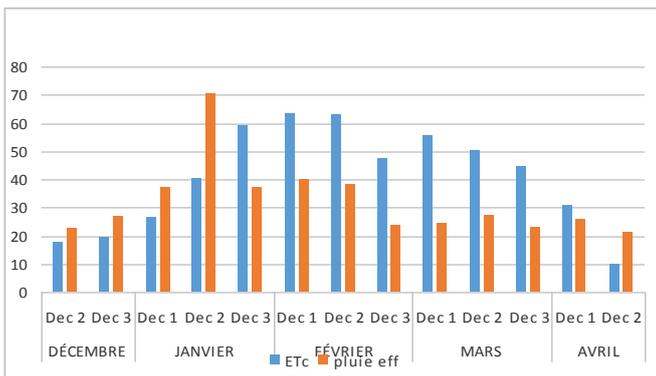
- Tsihombe



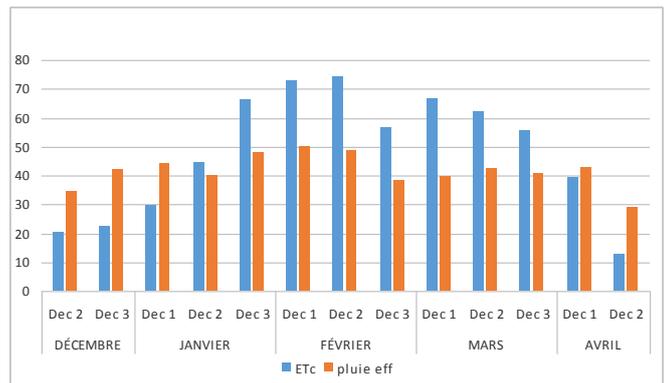
- Ambovombe



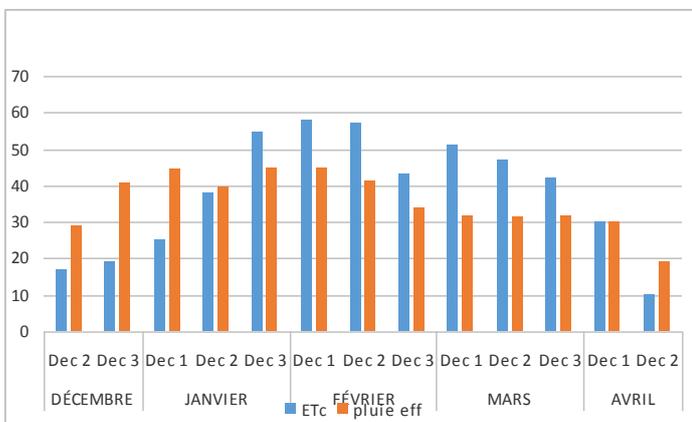
- Beloha



- Amboasary



- Bekily



- Taolagnaro

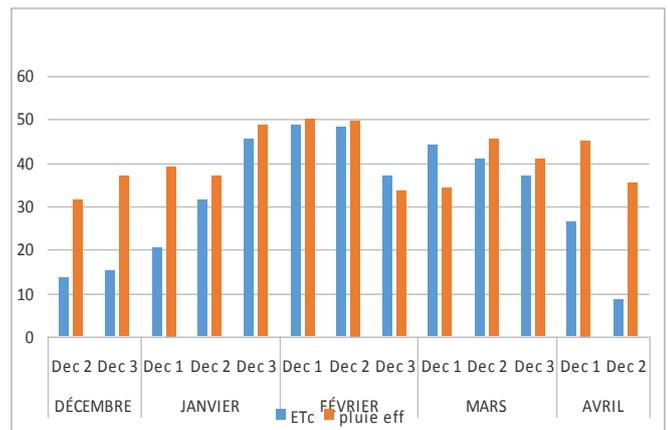


Figure 13: Histogrammes d'irrigation des six stations

Ces figures illustrent l’histogramme des besoins en irrigation par décade de la culture de sorgho dans les six stations. Le bleu représente le besoin en eau ainsi que le marron c’est la pluie efficace. Leur différence donne le besoin en irrigation ou le drainage.

Le besoin en irrigation pendant un cycle cultural est environ de 153.9mm. La capacité d’adaptation du sorgho au stress hydrique est bien connue. Cependant elle a ses limites qui ont été mises en évidences ces dernières années. Remarquons sur la figure que la pluie efficace est presque suffisante dans toutes les stations au quatre première décade sauf pour la station de Tsihombe. La pratique d’irrigation de culture du sorgho dans les régions d’Androy et Anosy commence à la cinquième décade (troisième décade du mois de décembre) jusqu’à la onzième décade (premier décade du mois d’avril). Pour Tsihombe seulement les trois premières décades et la dernier qui ont besoin d’une irrigation. Le calendrier d’irrigation des cultures est le quatrième résultat obtenu à partir de ce modèle CROPWAT 8.0. La figure 13 suivante décrit les résultats du calendrier d’irrigation des cultures du sorgho dans le district de Tsihombe.

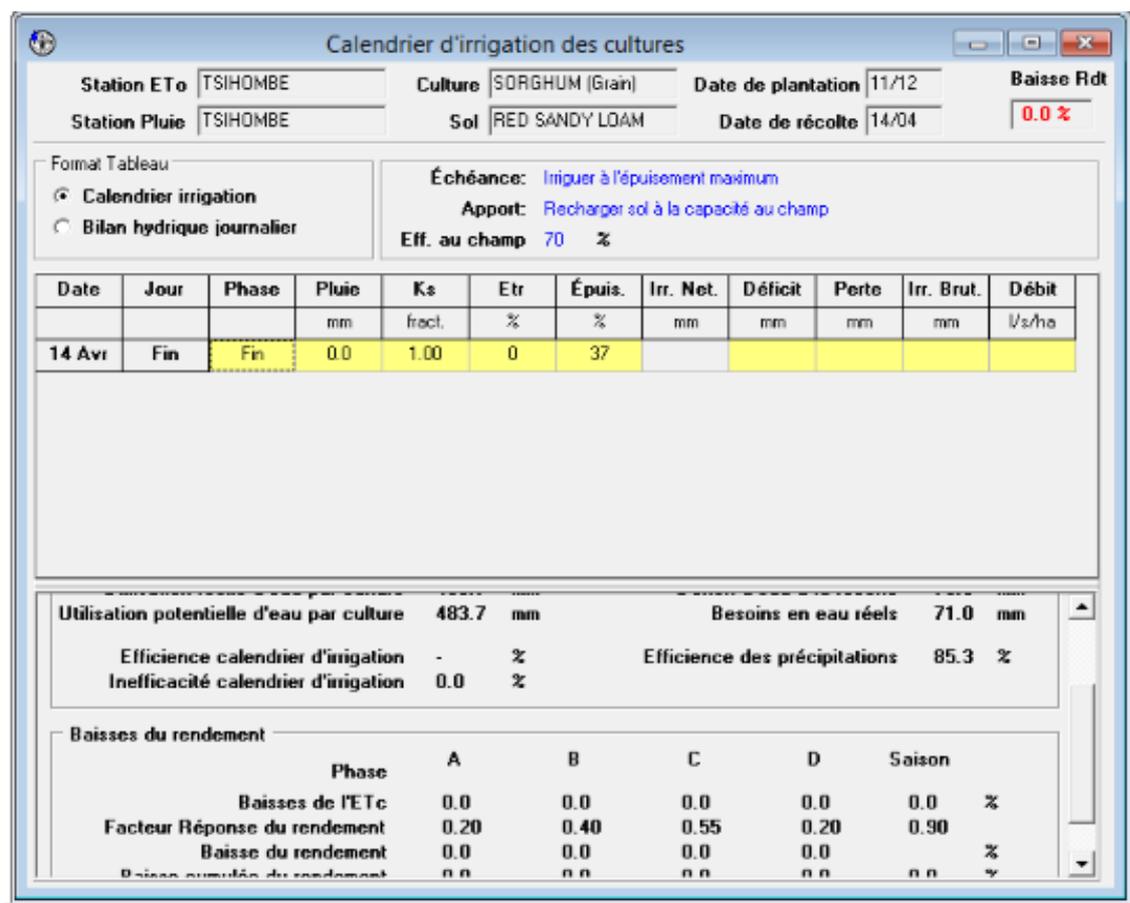


Figure 14: Calendrier d’irrigation à Tsihombe à partir du modèle CROPWAT

Le calendrier d'irrigation établie à l'aide du CROPWAT donne :

- La date d'irrigation ;
- La dose d'irrigation de chaque apport d'eau.

L'irrigation à l'épuisement maximal se situe dans la phase mi- saison au 90ème jour de la saison culturale. L'irrigation brute totale est de 153.9mm.

Le modèle CROPWAT estime qu'il y a une baisse de rendement de la culture du sorgho.

Voici l'histogramme d'irrigation du station de Tsihombe

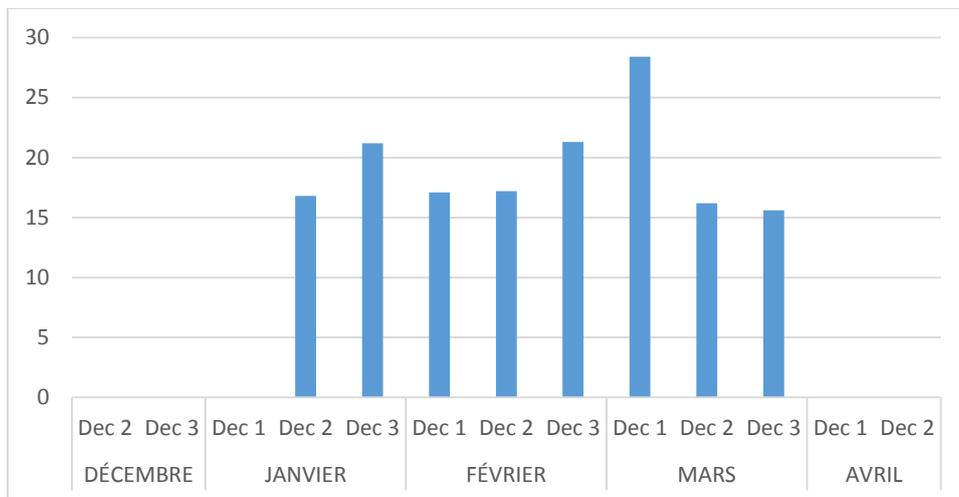


Figure 15: histogramme d'irrigation du sorgho du station de Tsihombe

La phase de mi- saison a le plus grand besoin d'irrigation pendant le cycle cultural par rapport aux autres phases surtout la phase initiale qui a la plus petite valeur.

Le modèle CROPWAT peut donner le résultat d'irrigation journalière en cliquant sur le bouton 'bilan hydrique journalier' dans la figure 15. Donc la figure suivante illustre le résultat du bilan hydrique journalier à partir de ce modèle.

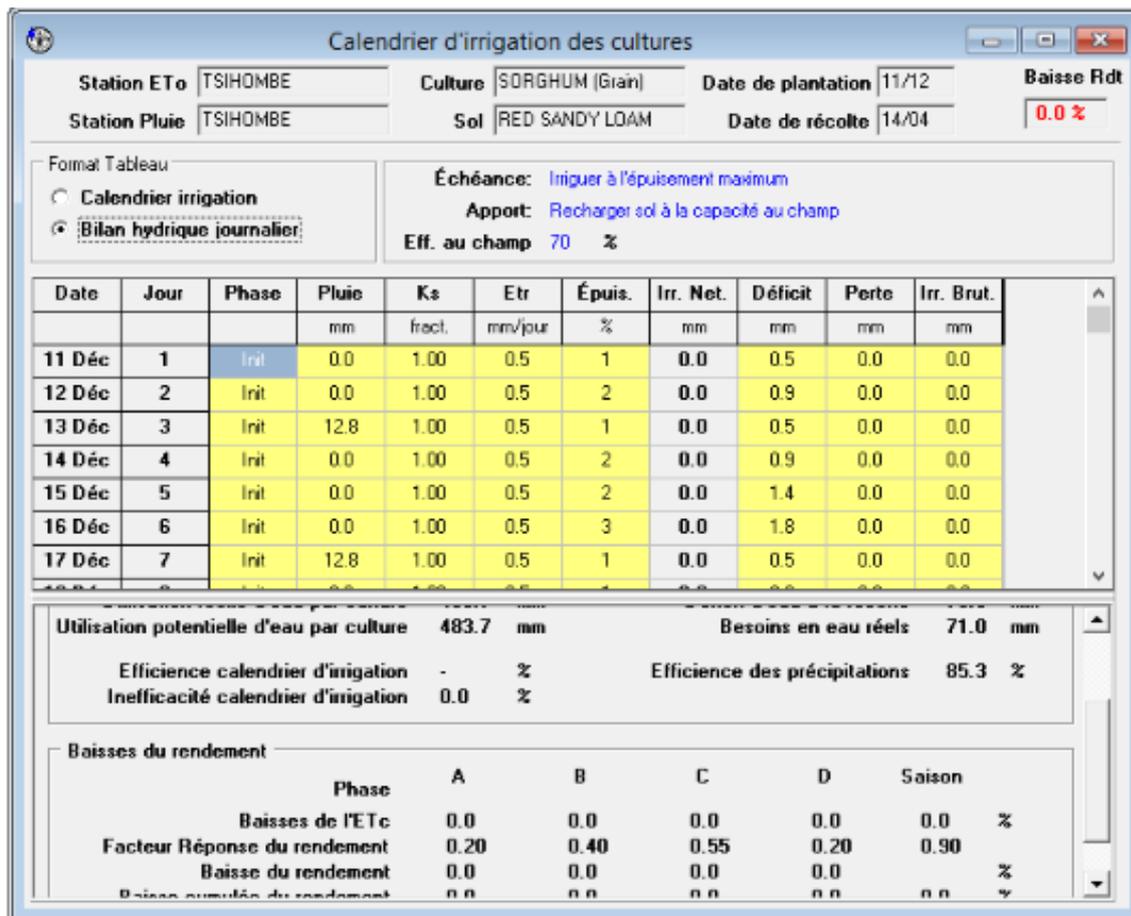


Figure 16; Bilan hydrique journalier du sorgho à partir du modèle CROPWAT

CHAPITRE 6 Analyse et Discussion du période contre saison

6.1 Bilan hydrique dans les régions d'Androy et Anosy

L'étude du bilan hydrique est utilisée pour déterminer la saison humide pendant un cycle cultural et pour faire l'analyse agronomique.

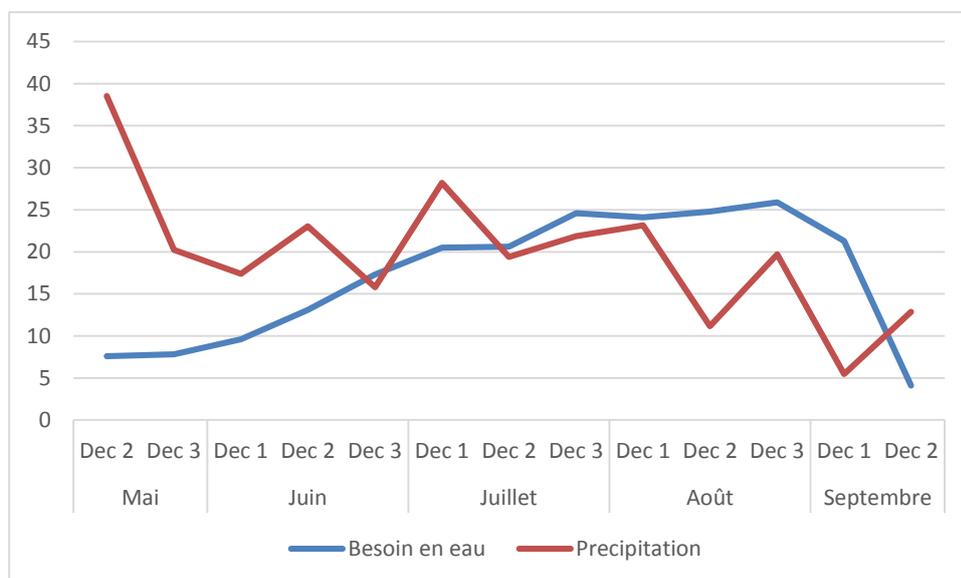


Figure 17: Courbe de besoin et précipitation efficace des six station

La figure ci-dessus nous montre le besoin en eau et la précipitation efficace des six stations pendant le cycle cultural en contre saison. On remarque que durant les sept premières décades (mai à mi-juillet), la précipitation recouvre bien le besoin en eau des cultures. La pratique d'irrigation n'est nécessaire qu'à partir de la huitième décade qui est la phase de floraison. Le sorgho est une plante qui a besoin de moins d'eau pour pouvoir fournir un rendement en grains comparable à celui du maïs.

Voici un schéma qui montre le cycle cultural de sorgho en contre saison :

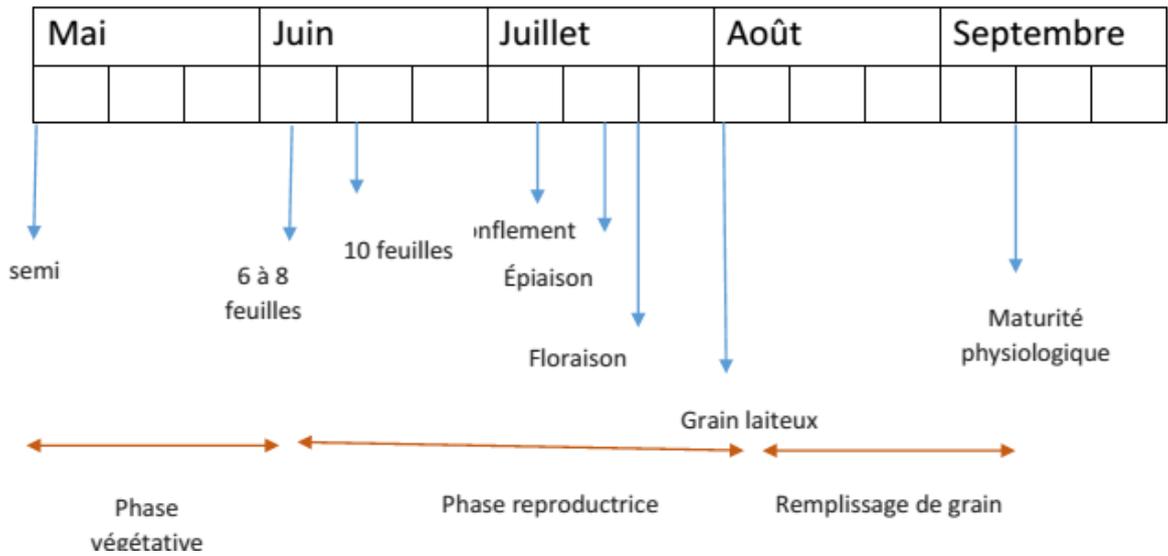


Figure 18: cycle cultural du sorgho en contre saison

6.2 L'irrigation du sorgho

6.2.1 Comment irriguer le sorgho pour tendre vers le potentiel de rendement en année sèche ?

La stratégie sera la suivante en sol de réserve moyenne : terrefort de coteaux, groies moyennes, sables peuargileux, ...

=> Avant 10 feuilles, l'irrigation n'est pas utile sauf pour aider à la levée.

=> A partir de 10 feuilles, s'il n'y a pas eu de pluie significative (supérieure à 20 mm), il faut effectuer la première irrigation.

En sol très profond (alluvions argileuses, groies profondes, ...) on pourra attendre le gonflement.

=>Après cette première irrigation, il faut apporter 35 mm tous les 10 à 12 jours ou 35 mm tous les 9-10 jours à partir du huitième à la quatorzième décade.

La figure suivante illustre l'historique de besoin en irrigation

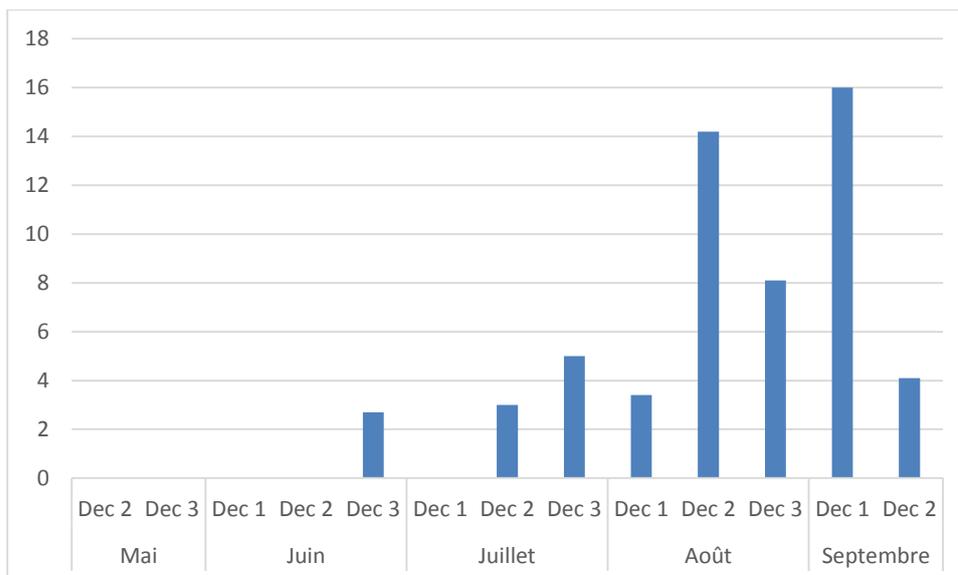


Figure 19: Histogramme de besoin en irrigation

6.2.2 Les périodes de sensibilité au stress hydrique

La période la plus sensible au manque d'eau se situe du stade gonflement à la floraison. En cas de stress hydrique pendant cette période, la fertilité des panicules est systématiquement affectée.

Avant cette période, pendant la montaison, du stade 8-10 feuilles au stade gonflement, un besoin en eau nonsatisfait peut limiter la croissance du peuplement, perturber l'épiaison de certaines variétés et affecter la fertilité des panicules. Ce risque est accentué en cas de densité de peuplement trop élevée.

La période de remplissage des grains après le stade grain laiteux est peu sensible, et l'enracinement alors à son développement maximum confère à la culture une forte capacité d'extraction d'eau dans le sol.

SYNTHESE

Dans cette dernière partie, notre travail s'est focalisé sur les études de besoins en eau et de besoins d'irrigations. Nous remarquons que les besoins en eau du sorgho sont plus importants pendant la phase arrière-saison que celle du développement. Remarquons aussi que le cas étudié dans ce mémoire se situe à la saison sèche ou période déficitaire d'où la nécessité de faire des irrigations surtout pendant la phase de mi-saison.

Avec seulement un besoin total de 400 à 500 mm (réserve du sol + pluie + irrigation), le sorgho est l'une des plantes cultivées les moins exigeantes en eau. Cependant, malgré la très grande capacité d'adaptation du sorgho face au défi hydrique, il existe des phases plus sensibles au stress. Comme toute céréale, la phase la plus critique se situe en phase reproductrice, entre le stade gonflement et la floraison. Un stress hydrique pendant cette phase affecte systématiquement la fertilité de la panicule.

La température est très importante pendant la croissance et le développement de la culture du sorgho. La longueur du cycle végétatif semis jusqu' à la maturation du sorgho dans les régions d'Androy et Anosy est environ 120 jours.

CONCLUSION

Pour conclure, le sorgho est une plante naturellement résistante en condition de stress hydrique. Cette tolérance provient à la fois de sa grande capacité à extraire l'eau du sol avec un système racinaire puissant mais également à sa capacité de régulation stomatique (gestion de l'évapotranspiration). Cependant, il existe des différences variétales.

Les calculs des besoins en eau du sorgho en utilisant le modèle CROPWAT 8.0 sont utilisées pour déterminer la taille d'un projet d'irrigation étant donné l'importance de la source d'eau, et pour concevoir les systèmes de distribution d'eau basés sur ces types de culture, le climat, les sols. Le calcul des besoins en eau par décade, facilite la pratique du calendrier d'irrigation pour éviter l'insuffisance ou l'excès d'eau.

Dans notre résultat, on en déduit que presque toutes les phases du cycle cultural ont eu recours aux irrigations

Le sorgho et son utilisation dans de multiples filières, humaine, animale et alcool, participe à un processus d'innovation à Madagascar. La culture de cette plante reste alors une grande solution pour la famine: ses graines sont avant tout utilisées pour la consommation humaine, bien que plusieurs populations au Sud de Madagascar vie la sous-alimentation, et ses tiges sont réservées aux animaux, exportées des champs ou bien lors de vaine pâture.

Table des matières

Remerciements	i
Sommaire	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	iv
Liste des abréviations et symboles	v
INTRODUCTION	2
PARTIE 1. GENERALITES	3
CHAPITRE 1 Présentation de la zone d'étude.....	4
1.1 Localisation.....	4
1.1.1 Limites géographiques.....	4
1.1.2 Position par rapport à la mer	6
1.1.3 Position par rapport à Antananarivo et Toliara	6
1.1.4 Les districts des deux régions (découpage).....	6
1.1.5 Répartition de la superficie pardistrict.....	6
1.2 Géologie.....	6
1.3 Climat.....	7
1.3.1 Le réseau de stations météorologiques.....	7
1.3.2 Vents.....	8
1.3.3 Régions climatiques	8
1.4 Hydrologie	9
1.4.1 Réseau de l'Androy.....	9
1.4.2 Réseau du Mandrare	9
1.4.3 Les rivières de la Côte-Est	9
1.4.4 Caractéristiques des bassins versants.....	9
1.5 Température	10
1.6 Sols et végétations.....	11
1.6.1 Sols	11

1.6.2 Végétations.....	11
1.7 Agriculture.....	12
CHAPITRE 2 Généralités sur le sorgho	13
2.1 Buts de la culture	13
2.2 Botanique.....	14
2.2.1 Description.....	14
2.2.2 Classification.....	15
2.2.3 Phase végétative	15
2.3 Ecologie	16
2.3.1 Besoins en chaleur.....	16
2.3.2 Besoins en eau	16
2.3.3 Besoins en lumière.....	17
2.3.4 Besoins en sol.....	17
2.3.5 Besoins en altitude.....	17
2.4 Culture	17
2.4.1 Multiplication.....	17
2.4.2 Préparation du sol.....	17
2.4.3 Choix et préparation des semences	18
2.4.4 Mode de semis	18
2.4.5 Quantité de semences.....	18
2.4.6 Profondeur de semis	18
2.4.7 Entretien.....	19
2.4.8 Fertilisation.....	19
2.5 Récolte et rendement	19
2.6 Maladies et ennemies	20
2.6.1 Maladies	20
2.6.2 Ennemis.....	20
2.7 Valeur alimentaire des grains de sorgho.....	21
PARTIE 2. METHODOLOGIE.....	22

CHAPITRE 3 Présentation du modèle	23
3.1 Modèle CROPWAT 8.0	23
3.2 Rôle et avantage du logiciel	23
3.3 Fonctionnement du modèle et les données d'entrées	23
3.3.1 Structure du Programme	24
3.3.2 Modules et formules utilisées	25
3.4 Les sorties du modèle	32
3.4.1 Table climatique :	32
3.4.2 Table des besoins en eaux des cultures	32
3.4.3 Table du programme d'irrigation	32
3.5 Organigramme globale du modèle CROPWAT	33
CHAPITRE 4 Description des données	34
4.1 Evapotranspiration potentielle ou ETP	34
4.2 Pluviométrie	34
4.3 Données agronomiques	34
4.4 Microsoft office Excel	34
PARTIE 3. TRAITEMENTS DES DONNEES ; ANALYSES ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS	36
CHAPITRE 5 Résultats obtenues	37
5.1 Evapotranspiration de référence ETo	37
5.2 Précipitations efficaces	38
5.3 Besoins moyens en eau de la culture	39
5.4 Besoin irrigation	44
CHAPITRE 6 Analyse et Discussion du période contre saison	48
6.1 Bilan hydrique dans les régions d'Androy et Anosy	48
6.2 L'irrigation du sorgho	49
6.2.1 Comment irriguer le sorgho pour tendre vers le potentiel de rendement en année sèche ?	49
6.2.2 Les périodes de sensibilité au stress hydrique	50
CONCLUSION	52
BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE	I

ANNEXE II

BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] FAOSTAT, 27 novembre 2016.
- [2] «Inventaire des Fivondronana de Madagascar/ Ministère des Finances et du Budget».
- [3] «Direction Générale de la Météorologie».
- [4] Guide de sorgho 2015.
- [5] «STRATEGIES DE CONDUITE DE L'IRRIGATION DU MAÏS ET DU SORGHO».
- [6] BOIS : Les plantes alimentaires chez tous les peuples et à travers les âges.
- [7] CERICHELLI : Cultures tropicales, Plantes Vivrières.
- [8] LAVIGNE : Aperçu sur la culture du Sorgho dans la Province de Tuléar.
- [9] PIEDALLU : Le Sorgho.
- [10] AGRONOMIE TROPICALE.
- [11] N. T. Olivier DEBAUCHE, Manuel d'utilisation du logiciel CROPWAT 8.0 en français.
- [12] Cours de Météorologie Agronomie par Mr RAZAFINDRAKOTO Benjamin« 2016-2017 ».

WEBOGRAPHIE

www.ragt-semences.com

<http://www.matin.mg/?p=32207/> Madagascar Matin : sorgho – Relance de la filière

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Sorgho>.

<http://www.debauche.info>

<http://www.tadrist.info>

ANNEXE

ANNEXE 1 : Etp des six stations de la zone d'étude

			janv	fev	mars	avril	mai
Taolagnaro	46° 57'	25° 02'	145	125	120	98	75
Ambvombe CAT	46° 06'	25° 11'	161	141	129	103	70
Bekily	45° 19'	24° 13'	175	148	137	111	67
Beloha	45° 03'	25° 10'	187	163	148	111	73
Tsihombe	45° 29'	25° 18'	178	156	142	109	72
Ambosary	46°23'	24°57'	206	189	182	145	115

juin	juillet	aout	sept	oct	nov	déc
58	56	63	74	95	113	139
51	48	58	85	107	130	158
47	45	62	86	134	160	175
47	46	63	84	124	145	179
50	48	61	82	120	143	172
102	108	135	162	195	201	211

ANNEXE 2

Résultat obtenue au CROPWAT pour la station de Tsihombe

Mois	Décade	Phase	Kc coeff	ETc mm/jour	ETc mm/dec	Pluie eff. mm/dec	Bes. Irr. mm/dec
Déc	2	Init	0.30	0.46	4.6	22.5	0.0
Déc	3	Crois	0.30	0.88	9.7	26.0	0.0
Jan	1	Crois	0.45	2.17	21.7	33.8	0.0
Jan	2	Crois	0.67	4.10	41.0	24.2	16.9
Jan	3	Crois	0.90	5.37	59.1	37.9	21.2
Fév	1	Mi-sais	1.07	6.05	60.5	43.4	17.1
Fév	2	Mi-sais	1.08	6.02	60.2	43.0	17.2
Fév	3	Mi-sais	1.08	5.67	45.3	24.0	21.3
Mar	1	Mi-sais	1.08	5.31	53.1	24.7	28.4
Mar	2	Arr-sais	1.06	4.85	48.5	32.3	16.2
Mar	3	Arr-sais	0.92	3.91	43.0	27.4	15.6
Avr	1	Arr-sais	0.76	3.00	30.0	32.5	0.0
Avr	2	Arr-sais	0.65	2.38	9.5	11.0	0.0
					486.2	382.7	153.9

Résultat obtenue au CROPWAT pour la station de Beloha

Mois	Décade	Phase	Kc coeff	ETc mm/jour	ETc mm/dec	Pluie eff. mm/dec	Bes. Irr. mm/dec
Déc	2	Init	0.30	1.73	17.3	22.4	0.0
Déc	3	Crois	0.30	1.77	19.5	26.7	0.0
Jan	1	Crois	0.45	2.65	26.5	37.0	0.0
Jan	2	Crois	0.67	4.03	40.3	70.5	0.0
Jan	3	Crois	0.90	5.38	59.2	37.2	22.0
Fév	1	Mi-sais	1.07	6.33	63.3	39.9	23.4
Fév	2	Mi-sais	1.08	6.29	62.9	38.1	24.8
Fév	3	Mi-sais	1.08	5.92	47.3	23.3	24.1
Mar	1	Mi-sais	1.08	5.54	55.4	24.7	30.7
Mar	2	Arr-sais	1.06	5.05	50.5	27.2	23.3
Mar	3	Arr-sais	0.92	4.05	44.5	23.1	21.5
Avr	1	Arr-sais	0.76	3.08	30.8	25.8	5.0
Avr	2	Arr-sais	0.65	2.42	9.7	8.5	0.0
					527.3	404.2	174.9

Résultat obtenue au CROPWAT pour la station Bekily

Mois	Décade	Phase	Kc coeff	ETc mm/jour	ETc mm/dec	Pluie eff. mm/dec	Bes. Irr. mm/dec
Déc	2	Init	0.30	1.69	16.9	29.0	0.0
Déc	3	Crois	0.30	1.71	18.8	40.8	0.0
Jan	1	Crois	0.45	2.51	25.1	44.5	0.0
Jan	2	Crois	0.67	3.77	37.7	39.7	0.0
Jan	3	Crois	0.90	4.99	54.9	44.9	10.0
Fév	1	Mi-sais	1.07	5.81	58.1	44.9	13.2
Fév	2	Mi-sais	1.08	5.72	57.2	41.0	16.2

Fév	3	Mi-sais	1.08	5.40	43.2	33.6	9.6
Mar	1	Mi-sais	1.08	5.09	50.9	31.7	19.2
Mar	2	Arr-sais	1.06	4.68	46.8	31.4	15.3
Mar	3	Arr-sais	0.92	3.83	42.1	31.6	10.5
Avr	1	Arr-sais	0.76	2.99	29.9	29.9	0.0
Avr	2	Arr-sais	0.65	2.42	9.7	7.6	0.1
					491.2	450.5	94.2

Résultat obtenue au CROPWAT pour la station Ambovombe

Mois	Décade	Phase	Kc coeff	ETc mm/jour	ETc mm/dec	Pluie eff, mm/dec	Bes, Irr, mm/dec
Déc	2	Init	0,3	1,53	15,3	29,9	0
Déc	3	Crois	0,3	1,55	17	37,3	0
Jan	1	Crois	0,45	2,3	23	42	0
Jan	2	Crois	0,67	3,47	34,7	36	0
Jan	3	Crois	0,9	4,64	51	43,9	7,2
Fév	1	Mi-sais	1,07	5,47	54,7	47,6	7,1
Fév	2	Mi-sais	1,08	5,44	54,4	46	8,4
Fév	3	Mi-sais	1,08	5,13	41	34,3	6,7
Mar	1	Mi-sais	1,08	4,81	48,1	34,5	13,6
Mar	2	Arr-sais	1,06	4,41	44,1	39	5,1
Mar	3	Arr-sais	0,92	3,59	39,5	37,5	2
Avr	1	Arr-sais	0,76	2,79	27,9	41,8	0
Avr	2	Arr-sais	0,65	2,24	9	12,1	0
					459,8	481,9	50,1

Résultat obtenue au CROPWAT pour la station Taolagnaro

Mois	Décade	Phase	Kc coeff	ETc mm/jour	ETc mm/dec	Pluie eff. mm/dec	Bes. Irr. mm/dec
Déc	2	Init	0.30	1.34	13.4	31.3	0.0
Déc	3	Crois	0.30	1.37	15.1	37.0	0.0
Jan	1	Crois	0.45	2.05	20.5	39.1	0.0
Jan	2	Crois	0.67	3.13	31.3	37.2	0.0
Jan	3	Crois	0.90	4.16	45.7	48.5	0.0
Fév	1	Mi-sais	1.07	4.87	48.7	50.2	0.0
Fév	2	Mi-sais	1.08	4.82	48.2	49.6	0.0
Fév	3	Mi-sais	1.08	4.61	36.9	33.5	3.4
Mar	1	Mi-sais	1.08	4.40	44.0	34.2	9.7
Mar	2	Arr-sais	1.06	4.10	41.0	45.6	0.0
Mar	3	Arr-sais	0.92	3.36	37.0	40.8	0.0
Avr	1	Arr-sais	0.76	2.63	26.3	45.1	0.0
Avr	2	Arr-sais	0.65	2.14	8.6	14.2	0.0
					416.7	506.3	13.1

Amboasary

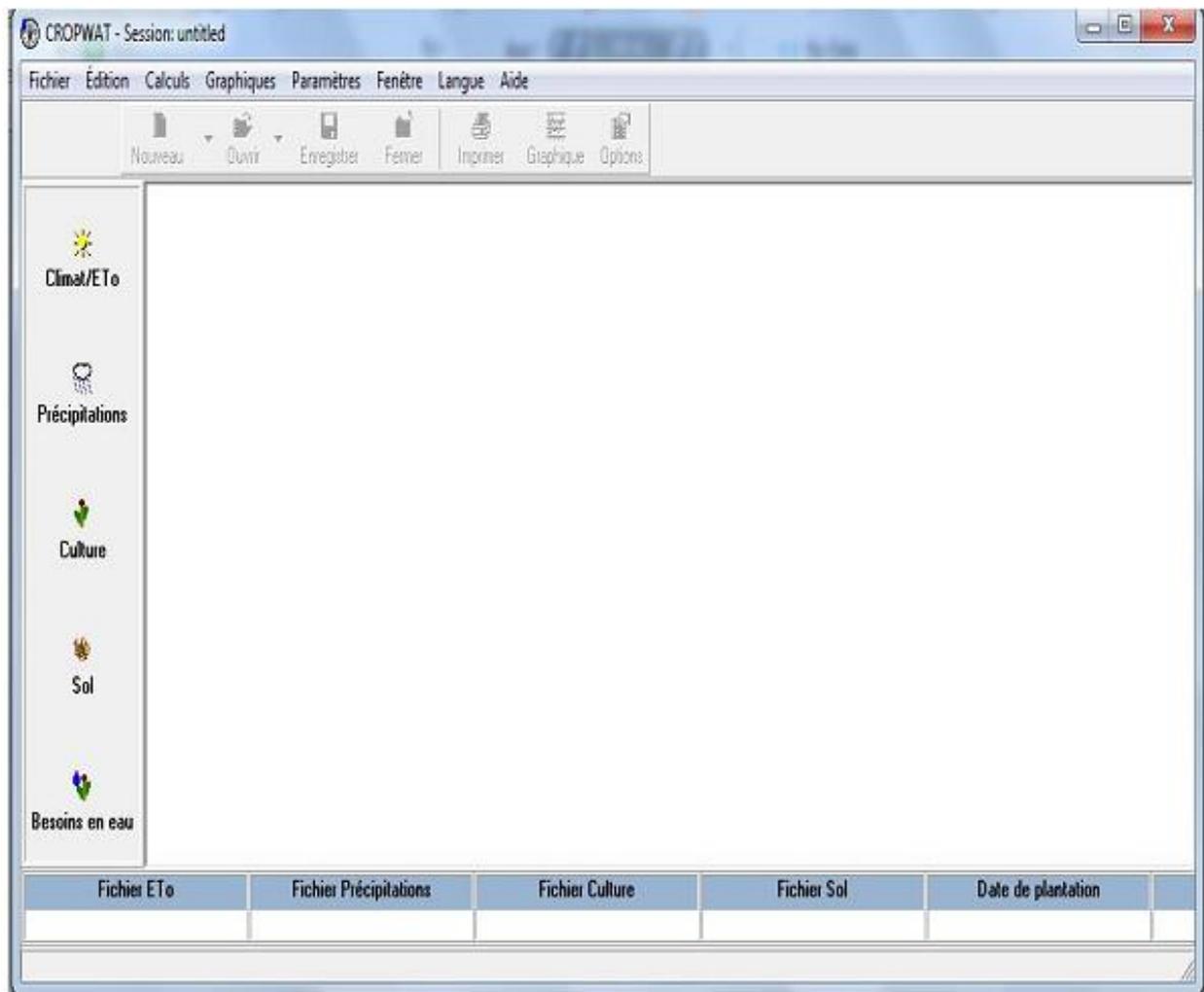
Mois	Décade	Phase	Kc coeff	ETc mm/jour	ETc mm/dec	Pluie eff. mm/dec	Bes. Irr. mm/dec
Déc	2	Init	0.30	2.04	20.4	34.8	0.0
Déc	3	Crois	0.30	2.04	22.4	42.2	0.0
Jan	1	Crois	0.45	2.98	29.8	44.3	0.0

Jan	2	Crois	0.67	4.44	44.4	40.1	4.3
Jan	3	Crois	0.90	6.03	66.3	47.8	18.6
Fév	1	Mi-sais	1.07	7.29	72.9	49.8	23.1
Fév	2	Mi-sais	1.08	7.41	74.1	48.5	25.5
Fév	3	Mi-sais	1.08	7.05	56.4	38.4	18.1
Mar	1	Mi-sais	1.08	6.66	66.6	39.7	27.0
Mar	2	Arr-sais	1.06	6.22	62.2	42.5	19.7
Mar	3	Arr-sais	0.92	5.06	55.7	40.9	14.8

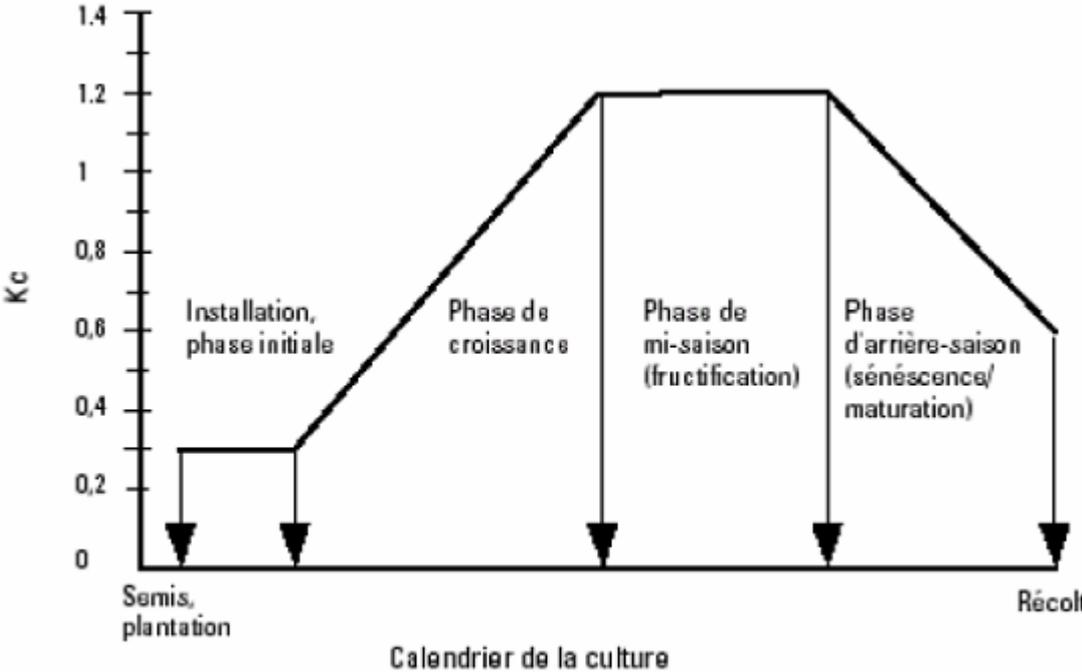
Données utilisées : données des précipitations de 30 ans des régions d'Androy et Anosy

ANNEXE 4

Interface du modèle CROPWAT 8.0



ANNEXE 5 : Coefficient cultural (K_c) en fonction du développement de la culture



Source : Mémento d'agronome 2002